

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a* В ПРОЛИВЕ ЛАПЕРУЗА ПО СПУТНИКОВЫМ И СУДОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Л. Ю. Гаврина, Ж. Р. Цхай, Г. В. Шевченко

Сахалинский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск)

ВВЕДЕНИЕ

Для дальневосточных морей, в которых ведется интенсивный рыбный промысел, оценка биопродукционного потенциала среды важна как с научной, так и с практической точки зрения. Одним из основных показателей биопродуктивности океанических вод является фитопланктон – первичное звено трофических цепей водных экосистем (Водоросли..., 1989). Продукция фитопланктона вырабатывается в поверхностном фотосинтетическом слое. Поэтому большое значение приобретает возможность определения концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое океана как традиционными судовыми, так и дистанционными методами.

Большим недостатком экспедиционных методов является их трудоемкость. При этом сбор данных имеет локальный характер и охватывает краткосрочные периоды времени (Вентцель и др., 2000; Selina et al., 2004). Преимущество дистанционных методов состоит в оперативности и регулярности получения информации сразу на обширной географической площади. Это является существенным фактором, так как возникает возможность всестороннего статистического анализа полученных данных, в частности определение характеристик сезонной изменчивости концентрации хлорофилла *a*, а также особенностей пространственного распределения данного параметра в изучаемой акватории. В то же время существует проблема с использованием общепринятых алгоритмов расчета концентрации хлорофилла *a* для окраинных морей, характеристики вод в которых могут значительно отличаться от открытого океана. Для них были разработаны специальные методы анализа спутниковой информации (Reilly et al., 1998). В таких случаях для уточнения указанных алгоритмов и их «региональной привязки» следует вводить необходимые поправки на параметры атмосферной коррекции и озон, при этом желательно иметь данные прямых измерений для верификации полученных результатов (Shtraikhert, Zakharkov, 2004).

Тем не менее, спутниковые данные позволяют определить концентрацию хлорофилла *a* только в поверхностных водах, в то время как определенная мас-

са фитопланктона располагается в толще воды глубиной до 50 м, причем оценить вертикальную изменчивость изучаемого параметра возможно только с помощью традиционных экспедиционных методов.

Целью данной работы является описание пространственного распределения, а также сезонной и межгодовой динамики концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза на основе спутниковых данных, полученных станцией TeraScan в 2001–2004 гг. Выбор данного района для исследований продиктован, прежде всего, возможностью сравнения результатов расчета концентрации хлорофилла *a* по дистанционным измерениям с материалами, полученными при анализе проб воды поверхностного слоя, отобранных во время девяти комплексных экспедиций на НПС «Дмитрий Песков», выполненных в 2001–2002 гг. (Budaeva et al., 2004; Прорп, Гаврина, 2004). С другой стороны, сам пролив Лаперуза является интересным объектом исследований, в котором наблюдаются сложные океанологические и гидробиологические процессы, обусловленные влиянием как охотоморских субарктических, так и япономорских субтропических вод.

Целью статьи было получение количественных характеристик содержания хлорофилла *a* в проливе Лаперуза по дистанционным данным.

Авторами определены следующие задачи:

- анализ сезонной изменчивости и распределения концентрации хлорофилла *a* на поверхности в проливе Лаперуза по спутниковым данным с использованием метода естественных ортогональных функций (ЕОФ);
- анализ сезонной изменчивости и распределения концентрации хлорофилла *a* в заливе Анива (включая поверхностные и глубинные слои) по данным экспедиций на НПС «Дмитрий Песков» за 2001–2002 гг.;
- оценка соответствия полученных судовых данных спутниковым (рассчитанным по алгоритму OC2 с учетом атмосферной коррекции).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Спутниковые данные. Материалом для данного исследования послужили данные о концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза, полученные системой TeraScan с искусственного спутника Земли OrbView-2 при помощи сканера SeaWIFS. Рассматривался период времени со второго полугодия 2001 г. по первое полугодие 2004 г.

Концентрацию хлорофилла *a* рассчитывали по алгоритму OC2 (Reilly et al., 1998) с введением в него поправок на состояние атмосферы. Схема обработки спутниковой информации состоит из следующих этапов:

- получение и декодирование данных со спутников OrbView-2;
- привязка к местности по орбитальным элементам;
- инструментальная калибровка;
- введение поправок на прохождение излучения через атмосферу;
- маскирование земной поверхности и акваторий, в которых данные отсутствуют из-за влияния облачности;
- собственно расчет концентрации хлорофилла *a*.

Все необходимые для реализации заданной схемы метеорологические параметры: давление, ветер, влажность, толщина озонового слоя, температура воды и воздуха, предоставлялись через Интернет соответствующим сайтом NASA (<http://www.nasa.gov>).

Для количественного описания сезонных вариаций ТПО в проливе Лаперуза использовали метод естественных ортогональных функций (Багров, 1959). Некоторые детали данного метода изложены также в статье Ж. Р. Цхай и Г. В. Шевченко в настоящем сборнике. В качестве входных данных рассматривали среднедекадные распределения концентрации хлорофилла *a* на поверхности океана в районе, ограниченном координатами 44,31–46,77° с. ш. и 141,75–143,68° в. д., на сетке с разрешением около 2 км. Таким образом, исходная матрица состояла из 108 «временных слоев», каждый из которых имел размерность 70×140.

Судовые данные. Материалом для данной работы послужили также результаты анализа проб воды, отобранных в заливе Анива во время девяти экспедиций на НПС «Дмитрий Песков», выполненных в 2001–2002 гг. Отбор проб производили с поверхности пластиковым ведром и на стандартных горизонтах 10, 20, 30, 50, 75 и 90 м батометрами типа Niskin объемом 1,7 л. Концентрацию хлорофилла *a* определяли, используя спектрофотометрический анализ в соответствии с ГОСТ 17.1.04.02-90. В 2001 г. анализ проводили в лаборатории экспериментальной гидробиологии Института биологии моря ДВО РАН, а в 2002 г. – в химико-аналитической лаборатории СахНИРО на спектрофотометре СФ-56.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спутниковые данные. Результаты расчета собственных значений ковариационной матрицы в задаче разложения исходного поля вариаций хлорофилла *a* по ЕОФ представлены в таблице 1. Первые десять мод характеризуют 85% общей дисперсии изучаемого параметра, из которых около 70% приходится на первые три моды. Величины собственных значений существенно уменьшаются при переходе от первой моды ко второй и далее изменяются более плавно. На рисунке 1 показаны графики изменения амплитуд первых трех мод, а на рисунке 2 – соответствующие им пространственные распределения векторов.

Таблица 1

Результаты расчета собственных значений ЕОФ

Номер моды	Собственное значение	Доля дисперсии, %	Суммарная дисперсия, %
1	1,799	47,128	47,128
2	0,452	11,836	58,964
3	0,320	8,381	67,346
4	0,220	5,769	73,114
5	0,192	5,023	78,137
6	0,088	2,294	80,431
7	0,068	1,780	82,211
8	0,061	1,591	83,802
9	0,037	0,961	84,763
10	0,034	0,898	85,662

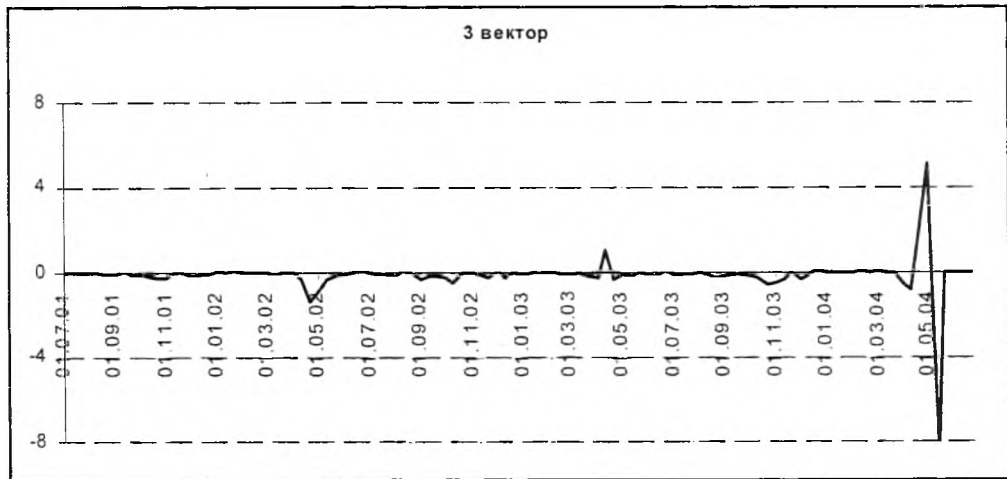
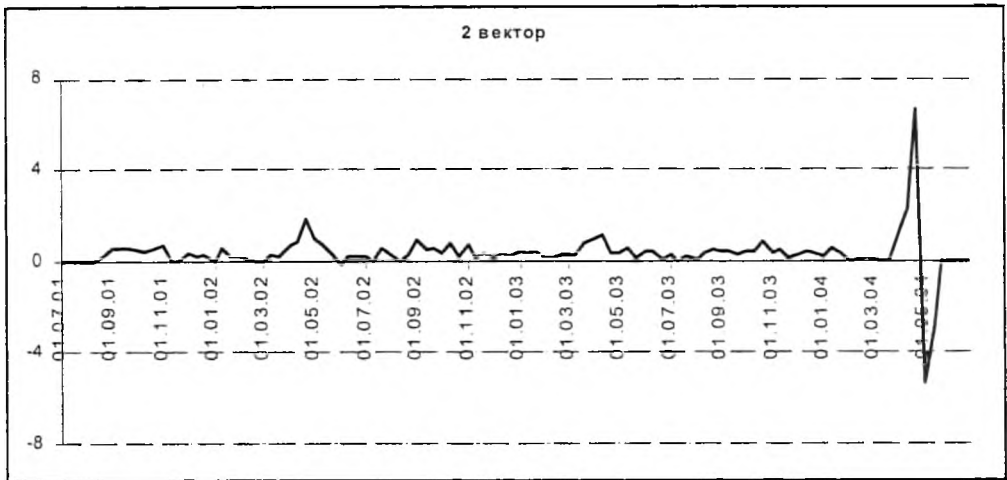
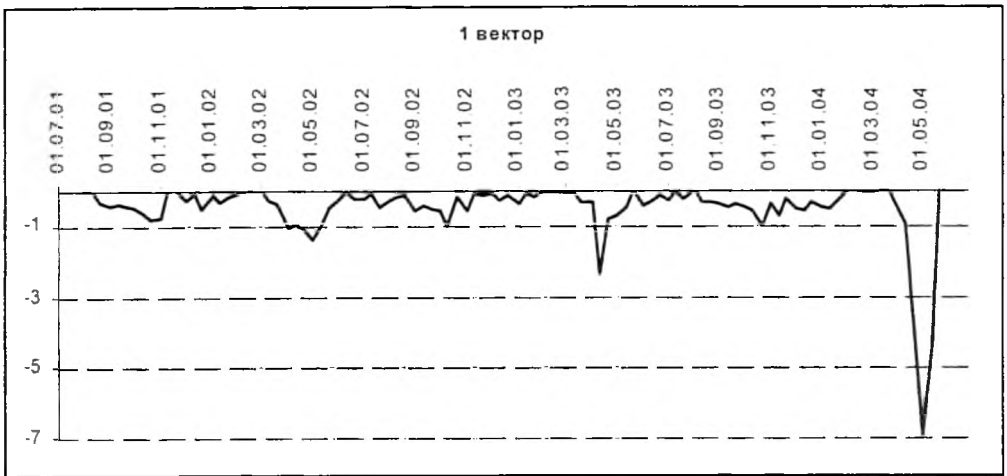


Рис. 1. Изменения во времени амплитуд первого, второго и третьего векторов ЕОФ в проливе Лаперуза за 2002–2003 гг.

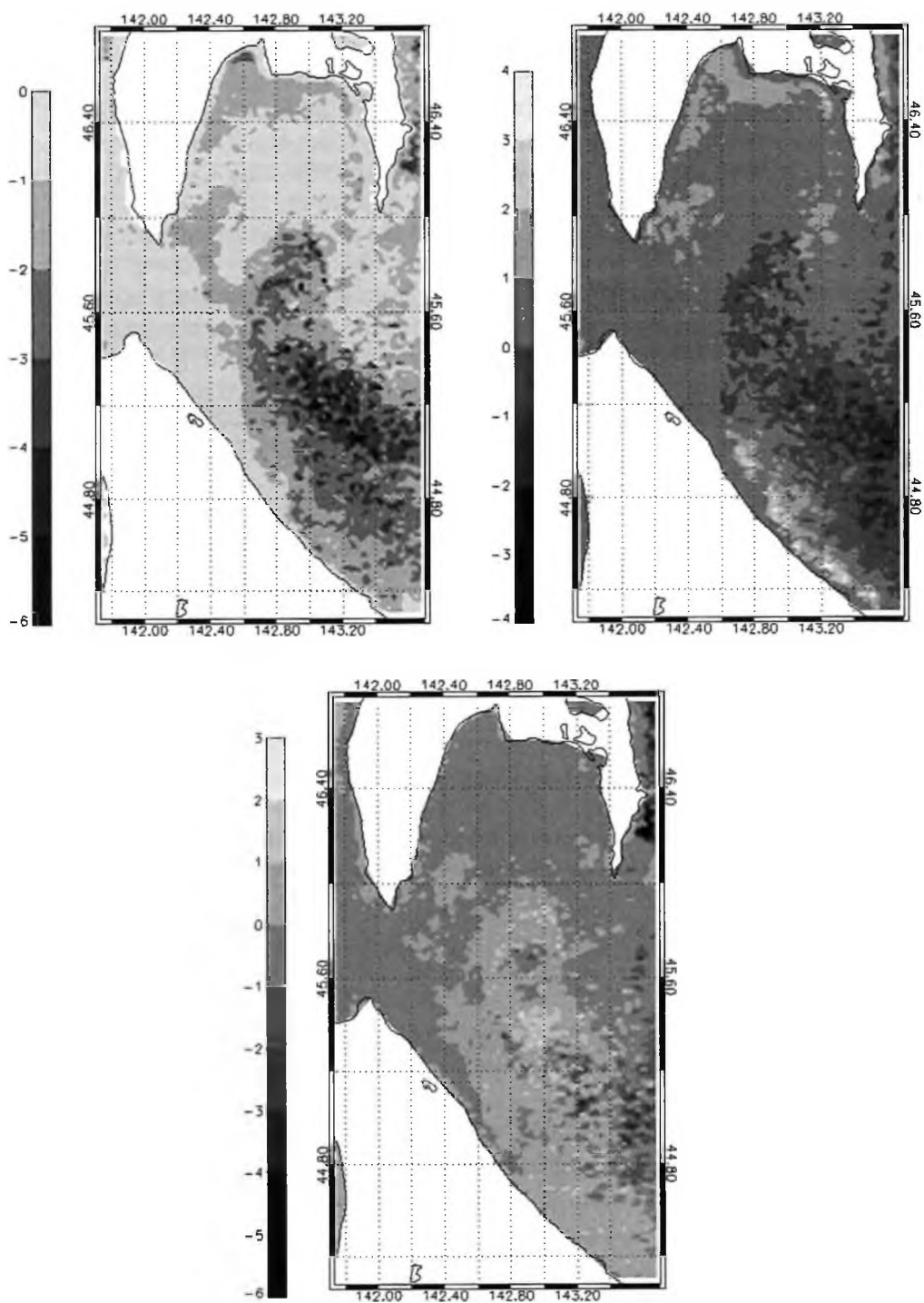


Рис. 2. Пространственное распределение первого, второго и третьего векторов ЕОФ в проливе Лаперуза за 2002–2003 гг.

Первая мода является основной, соответственно, ее пространственная структура и зависимость от времени отражают наиболее общие свойства вариаций концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза, поэтому рассмотрим их наиболее внимательно. Все значения амплитуды первого вектора одного знака – отрицательные. Хотя рассматривались данные всего за три года, уже можно выделить некоторые особенности сезонной изменчивости хлорофилла *a*, имеющие достаточно устойчивый характер. Прежде всего отметим, что амплитуда первого вектора всегда достигает своего годового пика (экстремальных отрицательных значений) в весенний период времени, а именно с середины апреля до середины мая. Так, в 2002 г. минимальная величина амплитуды (–1,4) отмечалась в первой декаде мая, в 2003 г. – во второй декаде апреля (–2,4), а в 2004 г. экстремальные значения (от –3,8 до –7) наблюдались довольно длительное время – с третьей декады апреля по вторую декаду мая. После весенней вспышки всегда наступал спад в летние месяцы, и амплитуда изменялась незначительно – от 0 до –0,6. Второй, более слабый экстремум приходился во всех случаях на осень – на вторую либо третью декаду октября, когда значения амплитуды достигали величины –1. В зимние месяцы колебания амплитуды были незначительными. Таким образом, по результатам анализа временной зависимости основной составляющей ЕОФ, выделялись два периода повышения концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза: более мощная весенняя вспышка – в апреле–мае и менее значительная, но достаточно отчетливая осенняя, – в октябре.

Повышение содержания данного вещества весной приурочено к таянию льда, и на фоне этого процесса – к активной фазе развития видов фитопланктона, содержащих хлорофилл *a*. Особенно в этом смысле показательна весенняя вспышка, когда на кромке тающего льда образуются массовые скопления холодолюбивых видов диатомовых (Водоросли..., 1989; Шунтов, 2001; см. статью Селиной и др. в наст. сб.). На акватории пролива лед преимущественно приносной, он транспортируется из северо-западной части Охотского моря Восточно-Сахалинским течением и поступает преимущественно в юго-восточную часть изучаемого района. Увеличение количества льда в проливе наблюдается при усилении ветров восточных румбов, что обычно происходит при прохождении циклонов над северной частью японского архипелага. Образование собственного ледяного покрова происходит только в заливе Анива, начиная с его северо-западной части.

Особенностью метода ЕОФ, ориентированного на выделение структур, «объясняющих» наибольшую долю общей дисперсии изучаемого параметра, является то, что первый вектор в большей степени характеризовал пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в момент максимального цветения фитопланктона. Значения первого вектора, как и его амплитуда, имели отрицательные величины по всему рассматриваемому району. Наибольшие отрицательные значения распределялись в юго-восточном секторе изучаемого района, их область вытянута от м. Крильон параллельно побережью о. Хоккайдо, причем по мере удаления от юго-западной оконечности Сахалина она расширяется с одновременным увеличением показателя. Выделяется также аналогичная зона в северной части залива Анива, с наибольшей интенсивностью в бухте Лососей, а также у восточного побережья Тонино-Анивского полуострова. Именно на этих участках наблюдался повышенный уровень содержания хлорофилла *a*. В цент-

ральной и юго-восточной части залива, а также в области течения Соя и прилегающей к проливу Лаперуза акватории Японского моря значения первого вектора близки к нулю, что означает более низкие значения концентрации изучаемого параметра в этих районах.

Как видно по амплитуде первого вектора, наблюдаются значительные межгодовые вариации его содержания, особенно выделялась весна 2004 г. На рисунках 3 и 4 представлены пространственные распределения хлорофилла *a* в периоды его максимальной годовой концентрации в 2002 и 2004 гг., что позволяет нам сравнить их между собой. В конце апреля 2002 г. повышенное содержание хлорофилла *a* отмечено только в заливе Анива, а в начале мая выделена лишь незначительная по размерам область в юго-восточной части пролива Лаперуза. В конце апреля 2004 г., напротив, цветение фитопланктона распространилось на большую часть пролива. У восточного побережья о. Хоккайдо и у мыса Крильон концентрация вещества достигала 30 мг/м³ и более. В первой декаде мая 2004 г. сформировалась обширная зона высокого содержания хлорофилла *a*, охватывающая всю центральную часть пролива, вытянутая в юго-восточном направлении. Она простиралась за пределами зоны теплого течения Соя, в нескольких милях от о. Хоккайдо вдоль всего его северо-восточного побережья. В то же время на некоторых участках пролива наблюдалась низкая концентрация хлорофилла *a* – менее 3 мг/м³, например, между мысом Крильон и мысом Соя, в южной акватории залива Анива.

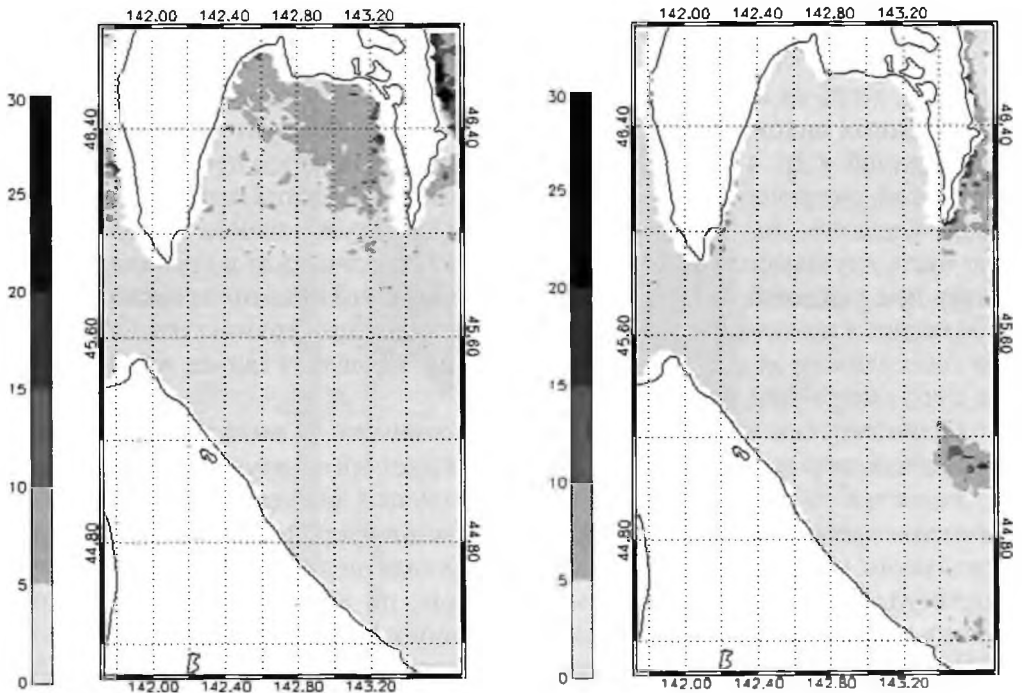


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза в третьей декаде апреля и первой декаде мая в 2002 г.

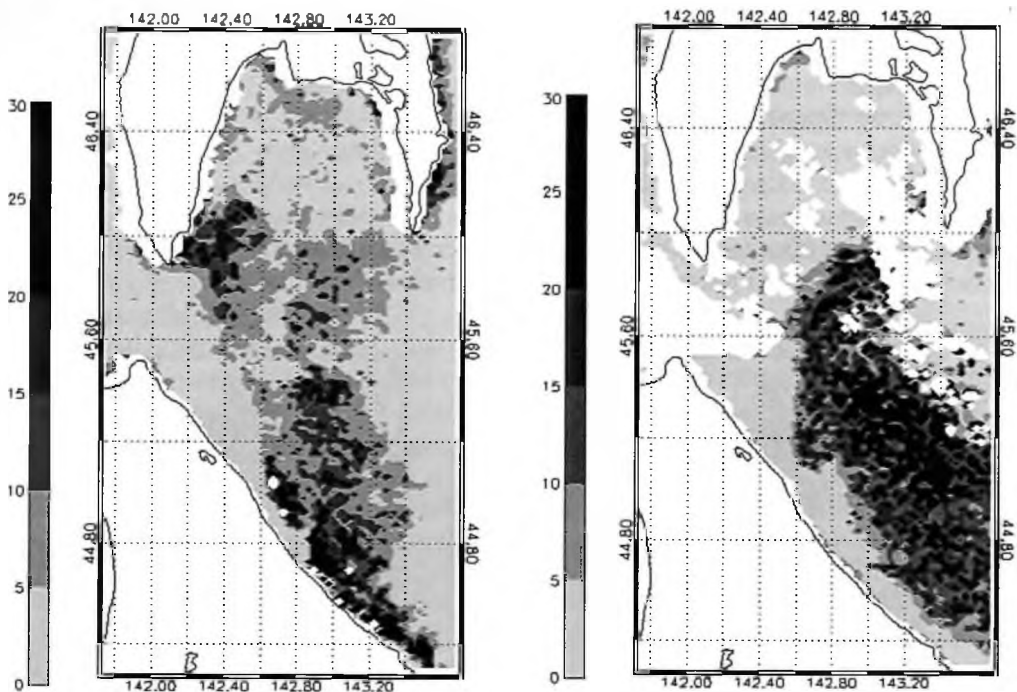


Рис. 4. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза в третьей декаде апреля и первой декаде мая в 2004 г.

Амплитуда второго вектора имела положительный знак на всем рассматриваемом промежутке времени, за исключением одной точки. Ее значения, кроме момента максимального развития фитопланктона весной 2004 г., невелики и варьируются от 0 до 2. Если при этом рассматривать пространственное распределение второго вектора, то мы увидим, что его структура в проливе Лаперуза в целом идентична первому вектору, но в отличие от него выделяются зоны, в которых изменения содержания вещества происходят в противофазе. Положительные значения вектора имели место в бухте Лососей, что говорит о повышенном содержании хлорофилла *a* в этом районе по сравнению с тем, как это описывается первой модой, практически в любой период времени. Причиной активной фотосинтетической деятельности может являться вынос биогенов стоками таких крупных рек южной части о. Сахалин, как Суся и Лютога. На рисунке 5 показано распределение хлорофилла *a* в момент осеннего цветения 2002 и 2003 гг. В обоих случаях бухта Лососей выделяется как область повышенной концентрации хлорофилла *a*. Отметим, что и пространственная структура содержания вещества, и значение амплитуды первого вектора для осеннего пика гораздо более устойчивы по сравнению с весенним максимумом – вероятно, октябрьский речной паводок, как влияющий фактор, является более стабильным по сравнению с ледовым покровом.

Участки с положительными значениями отмечены и у восточного побережья о. Хоккайдо, но в то же время буквально в нескольких милях на северо-восток от этого побережья образован участок с отрицательными значениями вектора. Из общего ряда значений второй амплитуды выделяются две экстремальные точки, а именно: наибольшее положительное значение (6,65) амплитуды в третьей декаде апреля 2003 г. и единственное отрицательное (–5,3) – на следую-

пцем отрезке времени (первая декада мая). Такое распределение указывает на то, что в третьей декаде апреля наблюдалось повышение содержания хлорофилла *a* у побережья о. Хоккайдо, а в начале мая область цветения сместилась на северо-восток, и в прибрежной зоне концентрация вещества стала минимальной. Изменение знака во второй амплитуде также позволило нам сделать вывод о необычно яркой вспышке хлорофилла *a* в этом районе именно весной 2004 г., тогда как в другие годы этого не наблюдалось. В частности, к концу апреля 2002 г. концентрация хлорофилла *a* на данном участке не превышала 1 мг/м^3 , при этом в бухте Лососей эта величина достигала 10 мг/м^3 (см. рис. 3).

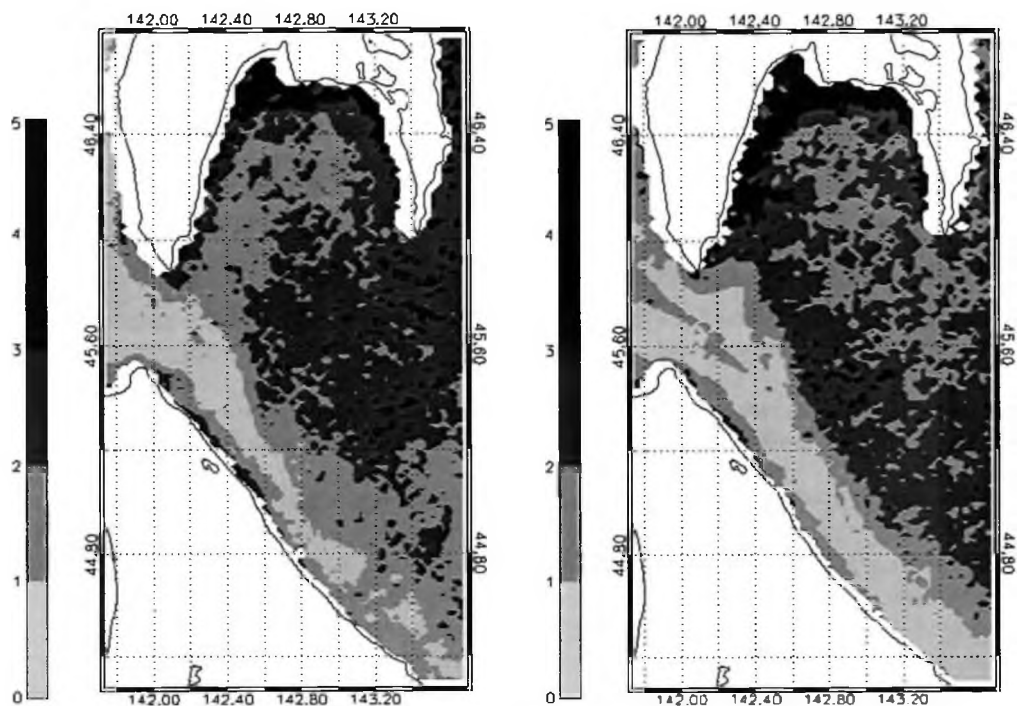


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза во второй декаде октября 2002 г. и третьей декаде октября 2003 г.

Величина амплитуды третьей моды в большинстве точек была близка к нулю, и ее колебания не превышали 0,5. Исключением явились несколько значений в третьей декаде апреля 2002 г. ($-1,4$) и во второй декаде апреля 2003 г. ($1,1$). В конце апреля – начале мая 2004 г., как и в случае второй моды, наблюдался своеобразный скачок от высоких до экстремально низких значений амплитуды. Что касается значений третьего вектора, то на большей части рассматриваемого района они распределялись в промежутке от -1 до 1 . В центральной части пролива Лаперуза выделялась небольшая область положительных значений вектора, а у восточного побережья Тонино-Анивского полуострова – зона отрицательных величин, что наряду с отрицательным значением амплитуды $-8,3$ указывает на повышенное содержание хлорофилла *a* в этом районе во второй декаде мая 2004 г. Следовательно, можно сделать вывод о корректирующем воздействии третьей моды путем внесения ею поправок, касающихся преимущественно особенностей распределения хлорофилла *a* на некоторых участ-

ках пролива Лаперуза в период весеннего цветения фитопланктона. В известной степени этот вывод можно отнести и ко второму вектору ЕОФ. Значительная межгодовая изменчивость изучаемого параметра весной, а также сравнительно короткий анализируемый ряд являются причиной менее устойчивых результатов, чем это получилось, например, при анализе температуры поверхности моря (см. статью Цхай и Шевченко в наст. сб.). Тем не менее, важный вывод о наличии двух пиков в годовом ходе концентрации хлорофилла *a* – выраженного весеннего и менее отчетливого, но достаточно стабильного осеннего, можно сделать с полной уверенностью.

Данные *In situ* 2001 г.

Апрель. В апреле на акватории залива Анива находились остатки разрушенного ледяного покрова. На поверхности среднее содержание хлорофилла *a* составляло 7,35 мг/м³ (табл. 2). В прибрежных районах залива содержание вещества было значительно выше. На мелководных прибрежных станциях 5 и 6 у восточного побережья полуострова Крильон концентрация хлорофилла *a* варьировалась от 9 до 11 мг/м³ (рис. 6). Наибольшая концентрация хлорофилла *a* наблюдалась у мыса Анива (14,59 мг/м³), в районе которого температура воды составляла +0,3°C и количество льда было наибольшим. В другой части залива, у мыса Крильон, где водные массы подвержены воздействию япономорских вод, модифицированных при интенсивном перемешивании (Budaeva et al., 2004), содержание хлорофилла *a* было значительно ниже – 4,21 мг/м³ при температуре воды –0,09°C.

Таблица 2

Статистические характеристики концентрации хлорофилла *a* в заливе Анива в 2001 г.

Горизонт	0	10	20	30	50	75	90
Апрель							
Среднее	7,35	9,66	4,19	3,55	0,31	0,32	0,20
Минимум	1,14	1,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,20
Максимум	14,59	20,57	10,50	11,93	1,42	1,14	0,20
Июнь							
Среднее	0,62	0,66	1,37	0,67	0,31	0,14	0,07
Минимум	0,14	0,28	0,46	0,32	0,00	0,00	0,00
Максимум	1,35	1,27	4,87	1,14	0,61	0,31	0,14
Август							
Среднее	0,10	0,40	0,77	0,64	0,04	0,00	0,00
Минимум	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Максимум	0,22	1,70	1,65	1,18	0,18	0,00	0,00
Октябрь							
Среднее	0,79	0,70	1,08	1,35	0,49	–	–
Минимум	0,18	0,17	0,35	0,63	0,20	–	–
Максимум	1,49	1,24	2,32	3,74	0,84	–	–
Ноябрь							
Среднее	1,49	1,45	1,29	1,16	0,04	0,00	–
Минимум	0,82	0,88	0,65	0,75	0,00	0,00	–
Максимум	2,21	2,85	1,97	1,75	0,22	0,00	–

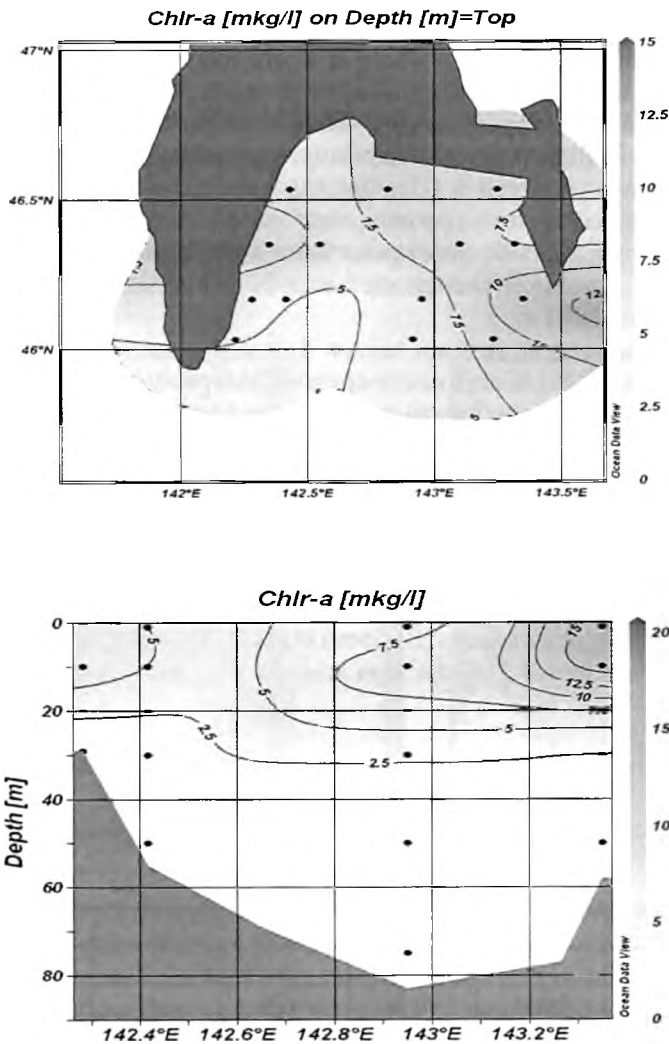


Рис. 6. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на третьем разрезе в апреле 2001 г.

Из таблицы 2 видно, что наибольшие концентрации вещества отмечались на глубине 10 м. Средняя концентрация хлорофилла *a* на этом горизонте составляла $9,66 \text{ мг/м}^3$. Далее, с ростом глубин, она постепенно уменьшалась и на горизонте 50 м практически равнялась нулю. Что касается пространственного распределения вещества на глубине 10 м, то оно мало отличается от такового на поверхности. Максимальные концентрации зафиксированы у мыса Анива ($20,57 \text{ мг/м}^3$) и в прибрежных районах западной части залива Анива ($12\text{--}14 \text{ мг/м}^3$), а минимальные – в южной части залива (до 1 мг/м^3). Следует также отметить, что в восточной части залива процесс активной фотосинтетической деятельности продолжался и на глубине 20 м ($6\text{--}10 \text{ мг/м}^3$). Таким образом, в апреле 2001 г. на значительной части акватории залива Анива, как на поверхности, так и во всем верхнем 20-метровом слое, наблюдалось повышенное содержание хлорофилла *a*.

Июнь. Воды поверхностного слоя в период проведения измерений были достаточно хорошо прогреты (около 12°C). Содержание вещества в воде было незначительным (до 1 мг/м^3), что гораздо ниже, чем в апреле. Наибольшие концентрации хлорофилла *a* были обнаружены на горизонте 20–30 м, вблизи хорошо выраженного термоклина, ниже которого температура воды была отрицательной (до $-1,27^{\circ}\text{C}$). Вероятно, на данной глубине существовали более благоприятные условия для развития фитопланктона, в частности достаточное количество биогенов, поступающих из нижних слоев. Максимальное содержание хлорофилла *a* ($4,87 \text{ мг/м}^3$) зафиксировано в северо-западной части залива у бухты Лососей при температуре $-0,08^{\circ}\text{C}$ (рис. 7). Области повышенной концентрации обнаруживаются также в центральной части разреза мыс Анива – мыс Анастасии и в северо-восточной части залива, минимальные значения отмечены у юго-восточного побережья полуострова Крильон.

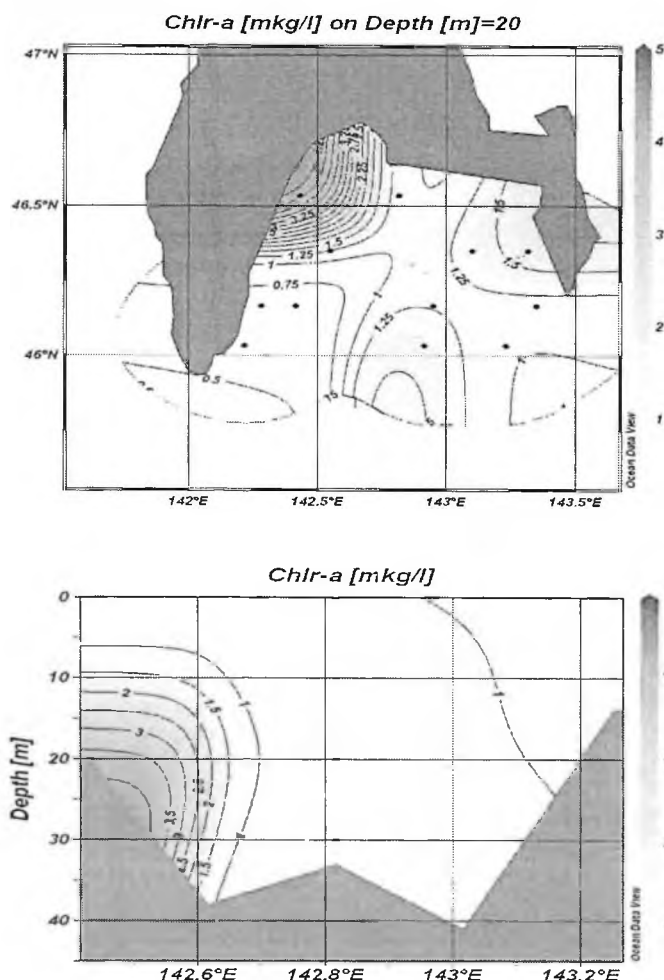


Рис. 7. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на горизонте 20 м и на первом разрезе в июне 2001 г.

Август. В августе вертикальные изменения температуры воды увеличились по сравнению с июнем и составили интервал от $-1,2$ до $19,1^{\circ}\text{C}$. На поверхности при высоких температурах и дефиците биогенов хлорофилл *a* практически отсутствовал, его концентрации варьировались от $0,02$ (предел обнаружения метода) до $0,22 \text{ мг/м}^3$. Основная масса фитопланктона продуцировалась вблизи термоклина, на глубинах $20\text{--}30 \text{ м}$, и также, как во время предыдущей съемки, в районе, прилегающем к бухте Лососей (рис. 8). Интересно отметить, что на поверхности в этой области концентрации вещества были на пределе обнаружения. Обращает также внимание тот факт, что в других местах, где ранее отмечались повышенные концентрации (центральная часть четвертого разреза, северо-восточная часть залива), на этот раз концентрация хлорофилла *a* была низкой.

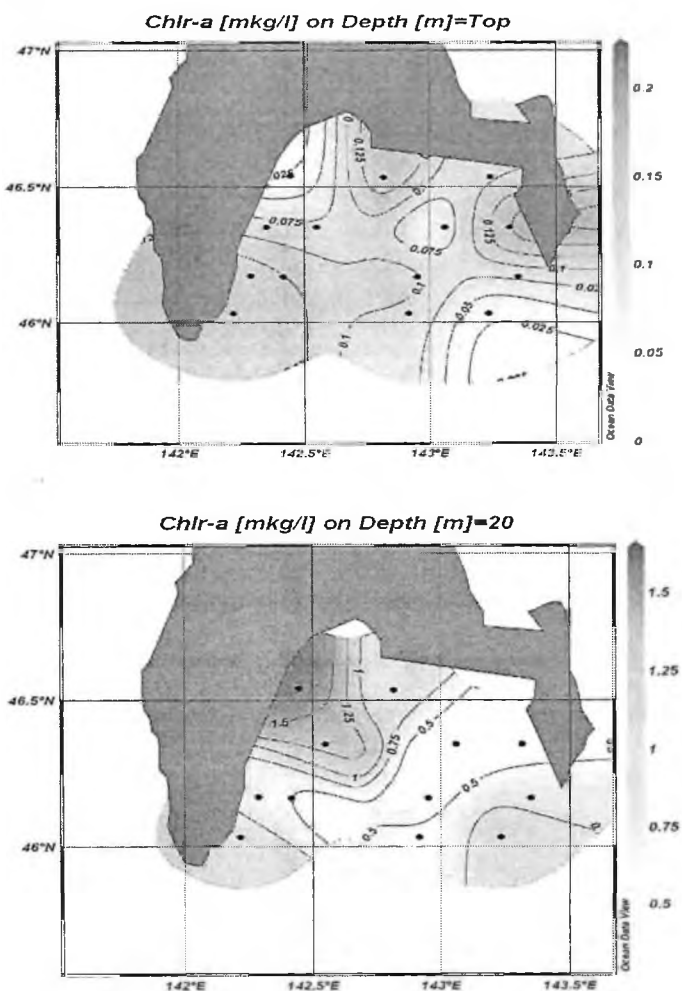


Рис. 8. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на горизонте 20 м в августе 2001 г.

Достаточно высокое содержание вещества (более 1 мг/м^3) отмечено у юго-восточного побережья полуострова Крильон, где обычно наблюдаются низкие значения.

Октябрь. Пространственные различия распределения хлорофилла *a* на поверхности моря были менее существенными, чем в летние месяцы (рис. 9). Максимальная концентрация хлорофилла *a* отмечена в восточной части залива у мыса Грина, минимальная – в центральной части залива. Основная масса вещества распределена на глубинах от 20 до 30 м при температуре воды в слое около 10°C. Здесь его средняя концентрация составила 1,2 мг/м³. Аналогичные подповерхностные максимумы в слоях 20–40 м с концентрациями хлорофилла *a* 0,9–1,24 мг/м³ обнаруживались в Баренцевом море (Ведерников, Гагарин, 1998). Тем не менее, вертикальные изменения в октябре были выражены слабее, чем в других случаях. Так, по ряду станций содержание хлорофилла *a* в сравнительно низких пределах от 0,20 до 0,84 мг/м³ отмечено на глубине 50 м, что явилось характерной особенностью данной съемки. У восточного побережья залива вообще наблюдается увеличение концентрации с глубиной, у берегов полуострова Крильон максимальные величины отмечены на горизонте 30 м, однако высокое содержание вещества сохраняется до дна, и только в центральной части залива получены более низкие значения во всей водной толще. Вероятно, заглубление вод, содержащих высокие концентрации вещества, было обусловлено прохождением над Сахалином 30 сентября, за два дня до выполнения съемки, глубокого циклона. Сильные ветра являются причиной интенсивного перемешивания именно в прибрежных районах, что подтверждается данными инструментальных измерений (см. статью Шевченко и др. в наст. сб.).

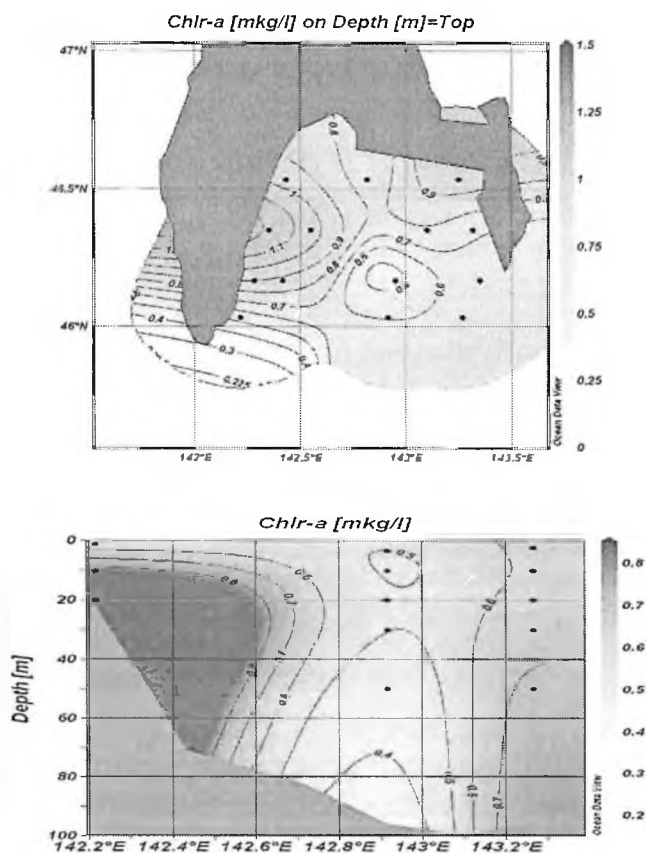


Рис. 9. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на четвертом разрезе в октябре 2001 г.

Средняя величина концентрации хлорофилла *a* в октябре выше, чем по измерениям в летние месяцы, что позволило нам сделать вывод о начале «второго пика» цветения микроводорослей.

Ноябрь. В ноябре концентрация хлорофилла *a* в верхнем 20-метровом слое варьировалась в пределах 0,8–2,2 мг/м³ при температуре около 7°C. В отличие от лета, на поверхности процесс развития фитопланктона шел более интенсивно, что, скорее всего, обусловлено охлаждением вод и уменьшением вертикального градиента температур в условиях поздней осени. Распределение хлорофилла *a* было равномерным практически по всей акватории залива, максимальная концентрация отмечена в его северо-западной части, что, вероятно, связано с сезонным увеличением речного стока (рис. 10).

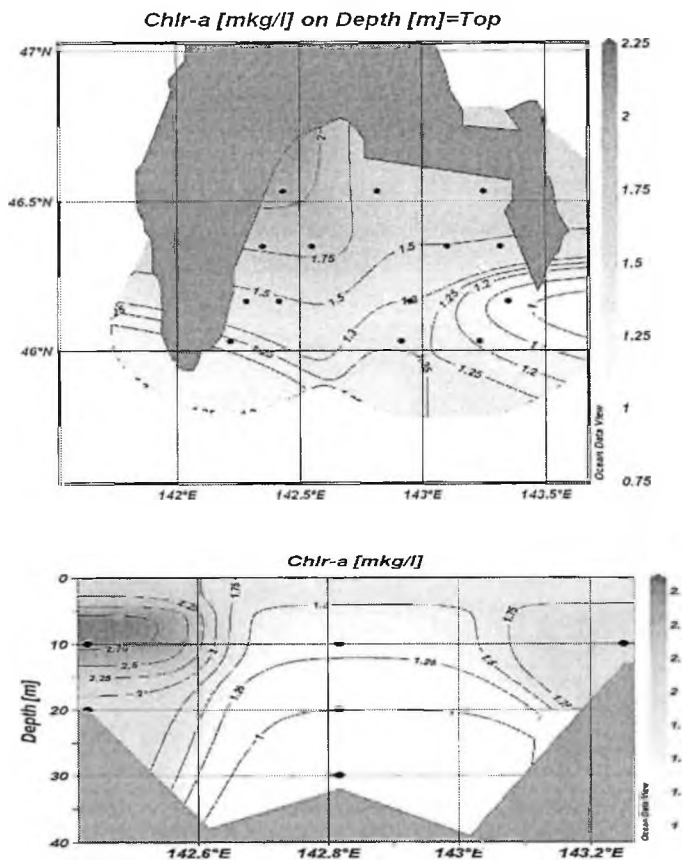


Рис. 10. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на первом разрезе в ноябре 2001 г.

В отличие от результатов октябрьской съемки, в данном случае на глубинах более 30 м концентрации хлорофилла *a* были низкими. Содержание вещества в более высоких интервалах (1,0–2,85 мг/м³) являлось характерной особенностью данного месяца и свидетельствовало о продолжающемся развитии осеннего пика цветения фитопланктона.

Данные *In situ* 2002 г. Статистические данные о концентрации хлорофилла *a* в заливе Анива в 2002 г. представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Статистические характеристики концентрации хлорофилла *a*
в заливе Анива в 2002 г.**

Горизонт	0	10	20	30	50	75	90
Апрель							
Среднее	1,47	1,46	0,78	0,31	0,06	0,00	0,42
Минимум	0,19	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Максимум	4,28	4,97	2,37	0,83	0,13	0,00	1,25
Июнь							
Среднее	0,75	1,08	1,76	0,47	0,20	0,00	0,00
Минимум	0,40	0,48	0,41	0,14	0,10	0,00	0,00
Максимум	1,27	2,71	7,96	1,03	0,43	0,00	0,00
Август							
Среднее	0,94	1,03	0,81	0,78	0,24	0,03	0,00
Минимум	0,47	0,56	0,32	0,17	0,00	0,00	0,00
Максимум	1,98	1,69	1,25	1,21	0,51	0,07	0,00
Ноябрь							
Среднее	1,33	1,38	1,45	1,06	0,54	0,30	0,20
Минимум	0,51	0,89	0,88	0,88	0,18	0,14	0,17
Максимум	2,26	2,29	2,33	1,25	0,94	0,52	0,22

Январь. В январе содержание хлорофилла *a* на всех горизонтах было ниже предела обнаружения.

Апрель. Весна 2002 г. была необычно ранней, характеризовалась малым влиянием облачности и интенсивным радиационным прогревом. В период проведения съемки в апреле акватория залива Анива была полностью свободен ото льда. В западной части залива температура воды на поверхности варьировалась от 0,88 до 1,86°C. В восточной части температура поверхности моря была несколько ниже – от 0,5 до 0,7°C, и только на прибрежном мелководье вода прогрелась до 1,24°C.

Концентрация хлорофилла *a* была значительно ниже, чем в этот же период 2001 г. Основная масса вещества располагалась в верхнем 30-метровом слое. Наибольшие концентрации (до 4,97 мг/м³) отмечены в северо-западной части залива в районе, прилегающем к бухте Лососей (рис. 11). На развитие фитопланктона в этом районе могло оказывать влияние распреснение вод, вызванное поступлением в бухту речных стоков. Средняя концентрация хлорофилла *a* на поверхности составляла 1,47 мг/м³ против 7,3 мг/м³ в 2001 г. Также следует отметить очень низкое содержание вещества в восточной части залива – менее 1 мг/м³ (у мыса Анива – 0,19 мг/м³).

В районе мыса Крильон значения изучаемого параметра низкие, как на четвертом разрезе, так и на разрезе S1 в северной части пролива Лаперуза.

Июнь. Как и в прошлом году, содержание хлорофилла *a* в воде было незначительным (около 1 мг/м³). На поверхности чуть большие концентрации вещества наблюдались на мористом участке, прилегающем к мысу Анива. Экстремально высокое содержание хлорофилла *a* (7,96 мг/м³) отмечено на глубине 20 м в западной части залива (рис. 12).

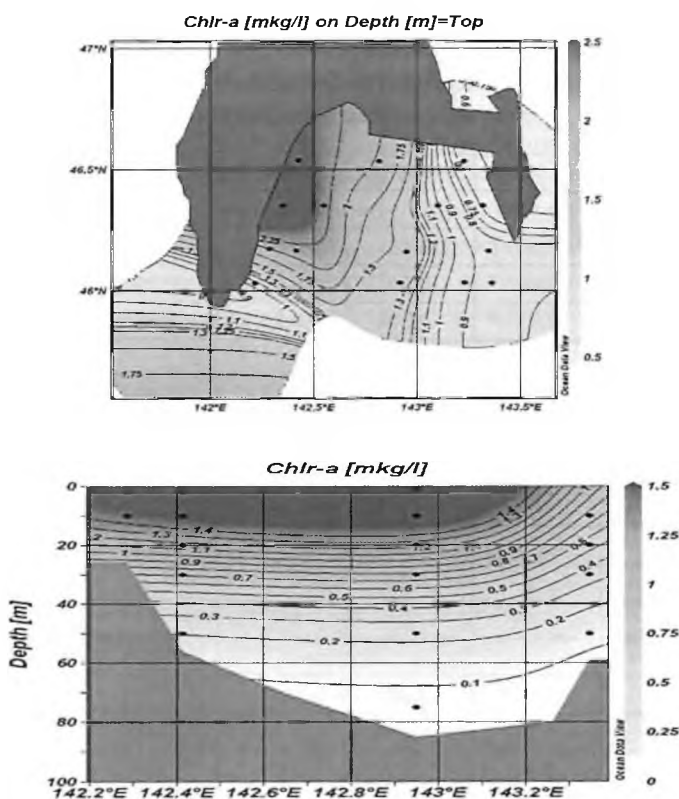


Рис. 11. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на третьем разрезе в апреле 2002 г.

Август. В результате климатических особенностей 2002 г. (прохладное дождливое лето), а также заглабленного слоя температурного скачка, сформировавшегося на глубинах 30–50 м, в фотическом слое залива были созданы благоприятные условия для развития фитопланктона, как в температурном режиме, так и в достаточном содержании биогенных элементов. Хлорофилл *a* распределялся равномерно в толще воды вплоть до глубины 50 м (рис. 13). Самыми продуктивными для летнего сезона 2002 г. были зоны, прилегающие к бухте Лососей, где хлорофилл *a* был обнаружен в максимальных концентрациях (1,29–1,98 мг/м³) на горизонтах от 0 до 20 м при значениях температуры воды 14–15,5°C.

Ноябрь. Исследования проводили с 30 октября по 2 ноября 2002 г. и подтвердили наличие осеннего пика цветения микроводорослей, которые в этот период проявлялся и на глубинах 10–20 м (рис. 14). На поверхности наиболее интенсивное развитие фитопланктона отмечено на двух участках – в прибрежной зоне в районе бухты Лососей, где максимальное содержание хлорофилла *a* составило 2,26 мг/м³ (станция 5), и в юго-восточной части залива на его открытой границе, с максимумом 2,25 мг/м³ (станция 21).

Следует отметить, что такое распределение на две зоны, возможно, связано с гидрологическими особенностями, обнаруженными в этот период на акватории залива. Результаты осенних съемок 2001 и 2002 гг. демонстрируют преемственность некоторых деталей горизонтальной структуры. В частности, в обоих случаях на картах поверхностной температуры были зафиксированы два втор-

жения менее теплых (6,6–8,0°C) вод со стороны внешнего шельфа, между которыми прослеживался сброс к югу теплых вод с пониженной соленостью из района бухты Лососей (см. статью Будаевой и др. в наст. сб.).

В количественном значении концентрация хлорофилла *a* в ноябре 2002 г. находилась на уровне прошлого года.

Анализируя полученные за два года данные, можно выделить некоторые закономерности и особенности содержания хлорофилла *a* в заливе Анива, прежде всего относительно характера его сезонной изменчивости.

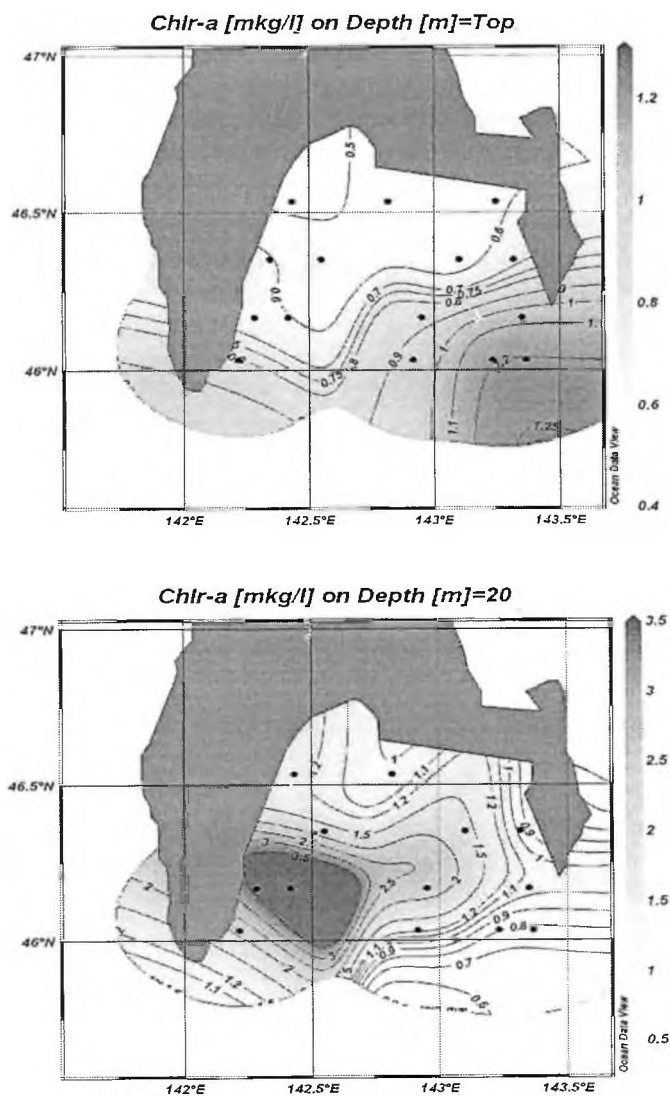


Рис. 12. Распределение хлорофилла *a* в заливе Анива на поверхности и на горизонте 20 м в июне 2002 г.

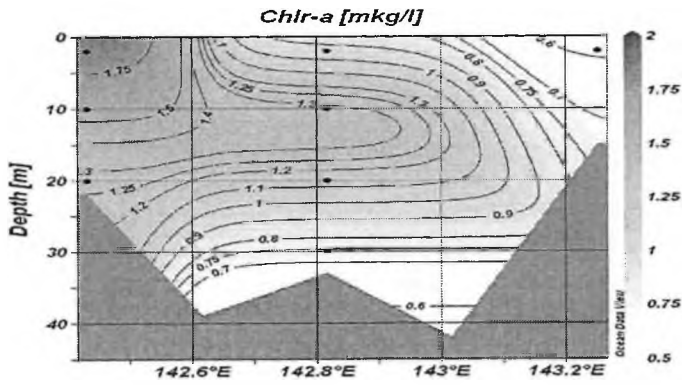
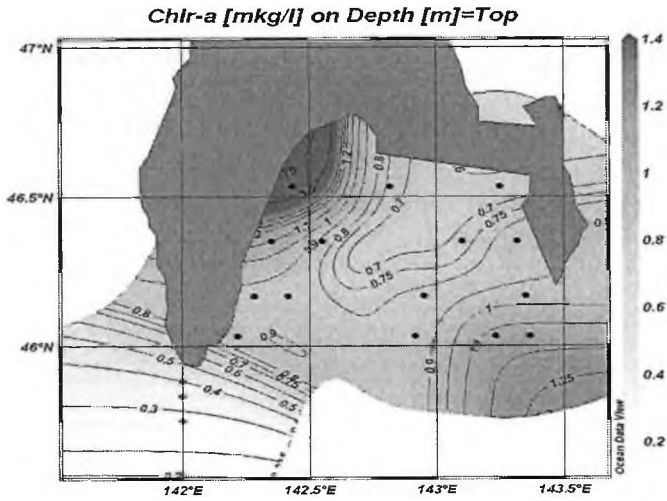


Рис. 13. Распределение хлорофилла а в заливе Анива на поверхности и на первом разрезе в августе 2002 г.

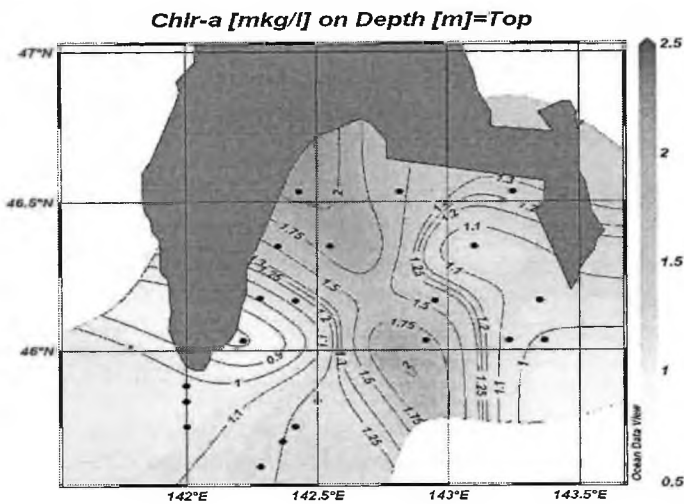


Рис. 14. Распределение хлорофилла а в заливе Анива на поверхности в ноябре 2002 г.

Наибольшее цветение микроводорослей, а, следовательно, высокие концентрации хлорофилла *a* наблюдались в апреле. Весной 2002 г. концентрация вещества была ниже, чем в предшествующем году, что может быть обусловлено отсутствием льда в заливе в период проведения экспедиции. В летние месяцы содержание вещества уменьшалось, а осенью наблюдался второй, более слабый по сравнению с апрельским, максимум, что хорошо согласуется с результатами анализа спутниковых данных.

Для концентрации хлорофилла *a* в различные сезоны года характерна значительная вертикальная изменчивость – исключение составляет октябрь 2001 г., причина такого отклонения от нормы остается невыясненной.

В 2001 г. термоклин сформировался на глубинах 20–30 м, хорошо выражен и препятствовал поступлению биогенных элементов в верхний фотический слой, в котором проявлялся их дефицит. Вблизи слоя скачка плотности фитопланктон наиболее активно продуцировал, создавая непосредственно под термоклином «кислородную подушку». В 2002 г. термоклин был выражен слабее и заглублен до 50 м, в фотическом слое из-за дождливого лета и за счет повышенного терригенного стока было достаточно питательных солей. Вследствие этого хлорофилл *a* имел более равномерное распределение по вертикали и обнаруживалось до глубины 50 м. В то же время для 2002 г. характерны значимые пространственные градиенты содержания вещества, с высокими концентрациями хлорофилла *a* в западной и низкими – в восточной части залива.

Сравнение распределения хлорофилла *a* по спутниковым и судовым данным. Для того чтобы определить соответствие получаемых со спутника данных натурным, мы провели сравнение данных, полученных при помощи станции TeraScan, с результатами анализа проб воды поверхностного слоя. Сравнение проводилось по спутниковым данным, отобраным в тот же период времени по всей акватории залива Анива. Данные *In situ* принимались как отражающие ситуацию в заливе Анива в целом. Результаты сравнения отражены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнение средних концентраций хлорофилла *a* в поверхностном слое воды в заливе Анива по судовым и спутниковым данным

Год	2001		2002			
	Апрель	Октябрь	Апрель	Июнь	Август	Ноябрь
Спутниковые	5,58	1,17	2,31	0,94	0,97	1,47
Судовые	7,35	0,79	1,47	0,75	0,94	1,33

Как видно, практически по всем сравниваемым периодам спутниковые и судовые данные находились в одном диапазоне изменений концентрации хлорофилла *a*. Отметим, что спутниковые данные характеризовали ситуацию на время максимального продуцирования фитопланктона, от 12 до 15 часов дня, и включали гораздо больший (на несколько порядков) массив данных.

Ранее в СахНИРО применялись алгоритмы обработки данных SeaWIFS, настроенные для вод открытого океана. Основным недостатком применения этих алгоритмов было значительное (более чем в три раза) завышение

расчетных спутниковых данных над натурными. Примененный нами алгоритм ОС2, учитывающий параметры атмосферной коррекции и озона, показал почти полную идентичность расчетных спутниковых данных натурным (по средним) и может быть рекомендован в дальнейшем для описания распределения и динамики концентрации хлорофилла *a* в Сахалино-Курильском регионе.

Оценка общего содержания хлорофилла *a*. Полученные данные о распределении хлорофилла *a* позволяют выделить зоны повышенного продуцирования и могут быть использованы для прогнозных работ по расчету первичной продукции и кормовой валентности первого трофического уровня.

Оценки вертикального распределения концентрации хлорофилла *a*, полученные при анализе судовых данных, могут быть использованы для вычисления некоторой «эффективной глубины», в пределах которой величина изучаемого параметра постоянна и равна значению на поверхности. Общее содержание вещества от поверхности до «эффективной глубины» эквивалентно его реальному содержанию в толще воды. Таким образом, значения глубин, рассчитанные для различных сезонов в заливе Анива, применимы для оценки общей массы вещества, имеющейся в проливе Лаперуза. Вычисление осуществлялось путем умножения площади каждого пикселя на значение концентрации в нем и на полученную описанным выше способом глубину (значения которой составляли в различных случаях около 20 м). Результаты интегральной оценки представлены в таблице 5.

Таблица 5

Оценка общего содержания хлорофилла *a* в проливе Лаперуза (т)

Период	2001	2002	2003	2004
Апрель	1570	1042	1865	1081
Май	901	1367	655	4061
Июнь	348	230	380	–
Август	341	300	394	–
Октябрь	647	1024	593	–
Ноябрь	781	622	1025	–

Из представленных данных заметна посезонная динамика развития фитопланктона. Общая масса хлорофилла *a* оценивается в летние месяцы в 200–400 т, в период осеннего цветения – в 600–1000 т, во время весенней вспышки – более 1000 т. В начале мая 2004 г. зафиксировано максимальное значение содержания вещества – более 4000 т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа спутниковых данных о концентрации хлорофилла *a* на акватории пролива Лаперуза с применением метода ЕОФ определены наиболее важные закономерности его пространственно-временной изменчивости.

В амплитуде первой моды ЕОФ, на которую приходится 47% общей дисперсии вариации изучаемого параметра, выделяется два максимума – весной и осенью.

Весенний максимум приурочен к окончанию таяния льдов в проливе и является наибольшим, в пространственном распределении выделяется область в юго-восточной части акватории, вытянутая вдоль побережья Хоккайдо на некотором удалении от него, а также зона в северной части залива Анива. Этот максимум характеризуется значительными межгодовыми вариациями как по времени наступления (вторая декада апреля – вторая декада мая), так и по пространству.

Осенний максимум менее выражен, но и более устойчив по сравнению с весенним, как по величине амплитуды и времени наступления (третья декада октября), так и по пространственному распределению.

Аналогичный характер сезонной изменчивости с двумя максимумами выявлен и по судовым измерениям на акватории залива Анива. При этом весной и осенью содержание вещества относительно равномерно распределено в верхнем 30-метровом слое, в то время как летом в поверхностном слое концентрации хлорофилла *a* незначительны, максимальные их значения приходится на глубины вблизи хорошо развитого термоклина, который препятствует проникновению биогенов в верхние слои. Летом 2002 г. из-за более дождливой и прохладной погоды термоклин был выражен слабее и заглублен до 50 м, соответственно менее выраженной была вертикальная изменчивость концентрации хлорофилла *a*.

Определение вертикальной структуры изучаемого параметра по судовым наблюдениям и пространственной – по спутниковым измерениям, позволило оценить общее содержание вещества в водах пролива Лаперуза. Общая масса хлорофилла *a* варьировалась от 200 до 4000 т, в зависимости от сезона.

*Авторы выражают благодарность экипажу НПС «Дмитрий Песков» за бесперебойную работу в экспедициях в зал. Анива в 2001–2002 гг. и помощь в работе с океанологическим и судовым оборудованием; Л. Н. Протт, кандидату биологических наук старшему научному сотруднику ИБМ ДВО РАН (г. Владивосток) за передачу опыта в сборе проб морской воды в судовых условиях и производстве анализов на определение содержания хлорофилла *a*; В. Н. Частикову за помощь в работе с программой «Ocean Data View».*

ЛИТЕРАТУРА

1. Багров, Н. А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих / Н. А. Багров // Тр. ЦИП. – 1959. – Вып. 74. – С. 3–24.
2. Ведерников, В. И. Первичная продукция и хлорофилл в Баренцевом море в сентябре–октябре 1997 г. / В. И. Ведерников, В. И. Гагарин // Океанология. – 1998. – Т. 38, № 5. – С. 710–717.
3. Вентцель, М. В. Закономерности распределения фитопланктона по акватории Северо-Западной Пацифики / М. В. Вентцель, В. В. Крылов, С. С. Левашова // Мор. гидробиол. исслед. : Сб. науч. тр. – М. : ВНИРО, 2000. – С. 11–21.
4. Водоросли : Справочник / Под ред. С. П. Вассера. – Киев : Наукова Думка, 1989. – 608 с.
5. ГОСТ 17.1.04.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. – М. : Гос. ком. СССР по охране природы, 1990. – 15 с.
6. Константинов, А. С. Общая гидробиология / А. С. Константинов. – М. : Высшая школа, 1979. – 480 с.

7. **Шунтов, В. П.** Биология дальневосточных морей России / В. П. Шунтов. – Владивосток : ТИНРО, 2001. – 580 с.

8. Specific features of seasonal and interannual variability of water structure and circulation in Aniva Bay during 2001–2003 / **V. D. Budaeva, G. V. Shevchenko, V. G. Makarov et al.** // PICES Scientific Report. – 2004. – No. 26 – P. 55–63.

9. Propp, L. N. Nutrients and chlorophyll *a* distribution in Aniva Bay, Sea of Okhotsk during 2001–2002 / **L. N. Propp, L. Yu. Gavrina** // PICES Scientific Report. – 2004. – No. 26 – P. 185–187.

10. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS / **J. E. Reilly, S. Maritorena, B. G. Mitchell et al.** // Journal of geophysical research. – 1998. – Vol. 103, No. C11. – P. 24,937–24,953.

11. Distribution of phytoplankton in the coastal waters of Sakhalin Island (Sea of Okhotsk) in summer 2001 / **M. S. Selina, T. V. Morozova, I. V. Stonik, T. Yu. Orlova** // PICES Scientific Report. – 2004. – No. 26 – P. 193–194.

12. Shtraikhert, E. A. 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 / **E. A. Shtraikhert, S. P. Zakharkov** // PICES Scientific Report. – 2004. – No. 26 – P. 143–150.

Гаврина, Л. Ю. Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла *a* в проливе Лаперуза по спутниковым и судовым измерениям / Л. Ю. Гаврина, Ж. Р. Цхай, Г. В. Шевченко // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2005. – Т. 7. – С. 156–178.

В результате анализа спутниковых данных о концентрации хлорофилла *a* на акватории пролива Лаперуза с применением метода ЕОФ выделены два максимума: более интенсивный, но менее устойчивый, в конце апреля – начале мая и более слабый, но стабильный, в конце октября – начале ноября.

В пространственном распределении выделяются область в юго-восточной части акватории, вытянутая вдоль побережья о. Хоккайдо на некотором удалении от него, а также северная часть залива Анива.

Аналогичный характер сезонной изменчивости с двумя максимумами выявлен и по судовым измерениям на акватории залива Анива. Причем весной и осенью содержание вещества относительно равномерно распределено в верхнем 30-метровом слое, в то время как летом максимальные их значения приходятся на слой вблизи хорошо развитого термоклина, который препятствует проникновению биогенов в поверхностный слой.

Сочетание результатов анализа спутниковых и судовых измерений позволило оценить общее содержание вещества в водах пролива Лаперуза от 200 до 4000 т, в зависимости от времени года.

Табл. – 5, ил. – 14, библиогр. – 12.

Gavrina, L. Yu. Seasonal variability of chlorophyll *a* concentration in La Perouse Strait derived from the satellite and ship measurements / **L.Yu. Gavrina, Zh. R. Tshay, G. V. Shevchenko** // Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. – Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2005. – Vol. 7. – P. 156–178.

Two maxima of concentration were distinguished using Empirical Orthogonal Function (EOF) method based on the satellite data for chlorophyll *a* distribution on the area of La Perouse Strait. The first one is more intensive, but less stable appearing in late April – early May, and the second is weaker, but stable appearing in late October – early November.

By a spatial distribution, both a field in the southeastern area stretched at some distance of Hokkaido along the coast, and a northern part of Aniva Bay have been distinguished.

The analogous character of seasonal variability with two peaks is revealed by ship measurements on the Aniva Bay area. In spring and autumn, chlorophyll *a* was found to be distributed relatively even in the upper 30-meter layer, whereas in summer its maximum appeared to be in the layer nearby the well-developed thermocline, which prevented nutrients penetration into the surface layer.

Combination of results obtained when analyzing satellite and ship measurements allowed estimating a total content of chlorophyll *a* in the La Perouse waters as from 200 to 4000 t due to the year season.

Tabl. – 5, fig. – 14, ref. – 12.