

О.А. Букин**, А.Н. Павлов*, М.С. Пермяков*, А.Ю. Майор*,
О.Г. Константинов*, А.В. Малеев*, С.А. Огай**

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХЛОРОФИЛЛА «А»,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЦВЕТА МОРЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ДВУХПОЛОСНЫХ АЛГОРИТМОВ**

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН
**Дальневосточная морская академия им. Г.И. Невельского

Поступила в редакцию 8.06.99 г.

Принята к печати 17.06.99 г.

Приводятся результаты восстановления концентрации хлорофилла «А» по спектрам восходящего из морской толщи излучения на основе различных двухполосных алгоритмов. Алгоритмы были применены для обработки экспериментальных результатов, полученных в некоторых районах Тихого океана. Одновременно с измерением спектров восходящего излучения проводилась лазерная флуориметрия морской воды. Данные лазерной флуориметрии были использованы для оценки достоверности значений концентраций хлорофилла «А», рассчитанных по различным двухполосным алгоритмам. Сравнение результатов измерений позволило сделать подбор новых коэффициентов в алгоритме с кубическими полиномами для расчета концентраций хлорофилла «А», при которых значения величин, характеризующих отклонения полученных концентраций от данных лазерной флуориметрии, являются минимальными.

1. Введение

Распределение интенсивности в спектре восходящего из морской толщи излучения содержит информацию о биооптических характеристиках морской воды [1,2]. К настоящему времени разработаны эмпирические и полуаналитические алгоритмы, которые позволяют с удовлетворительной точностью проводить измерение концентраций хлорофилла «А» в различных районах Мирового океана по спектральному распределению коэффициента отражения морской поверхности [3–6]. Точность восстановления концентраций хлорофилла «А» из спектров восходящего излучения зависит от многих факторов, основным из которых является число спектральных каналов при измерении спектрального распределения восходящего излучения. Большое число спектральных каналов позволяет не только восстанавливать спектральную зависимость коэффициента поглощения хлорофилла с хорошей точностью [7], но и проводить оценку содержания растворенного органического и взвешенных веществ в морской воде [8–10].

Использование на спутниках сканеров с большим числом спектральных каналов сопряжено с техническими

трудностями. Так, на сканере CZCS, работавшем на спутнике NASA Nimbus-7 (период работы с октября 1978 по июль 1986 г.), регистрация проводилась на четырех каналах в видимом диапазоне спектра. Сканер OCTS (период работы с ноября 1996 по август 1997 г.), установленный на спутнике ADEOS японского космического агентства NASDA, имел шесть полос в видимом диапазоне. Сканер NASA SeaWiFS, который работает на орбите в настоящее время, использует также шесть спектральных каналов в видимой области спектра. Для определения значений концентраций хлорофилла «А» используются, как правило, эмпирические алгоритмы, содержащие отношение коэффициентов отражения морской поверхности в различных спектральных диапазонах. Наиболее простыми из них являются двухполосные алгоритмы, которые используют отношение коэффициента отражения морской поверхности в двух спектральных интервалах (в сине-зеленой области) [3]. Наиболее широко применяемые двухполосные «глобальные» (т.е. применяемые в широком диапазоне значений концентраций хлорофилла «А») алгоритмы, взятые из [11], приведены в табл. 1.

Таблица 1

$C_1 = 10^{a_0 + a_1 R}$	$R = \log[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]; a_0 = 0,444; a_1 = -2,431$
$C_2 = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3}$	$R = \log[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]; a_0 = 0,45; a_1 = -2,86; a_2 = -0,3674$
$C_3 = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2}$	$R_1 = \ln[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]; R_2 = \ln[R_{rs}(510)/R_{rs}(555)]; a_0 = 1,025; a_1 = -1,622; a_2 = -1,238$
$C_4 = 10^{a_0 + a_1 R}$	$R = \log[R_{rs}(443)/R_{rs}(555)]; a_0 = 0,2492; a_1 = -1,768$
$C_5 = 10^{a_0 + a_1 R}$	$R = \ln[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]; a_0 = 1,077835; a_1 = -2,542605$
$C_6 = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3}$	$R = \log[R_{rs}(443)/R_{rs}(555)]; a_0 = 0,207; a_1 = -1,828; a_2 = 0,758; a_3 = -0,739$
$C_7 = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3}$	$R = \log[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]; a_0 = 0,341; a_1 = -3,0; a_2 = 2,811; a_3 = -2,04$
$C_8 = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3}$	$R = \log[R_{rs}(443)/R_{rs}(565)]; a_0 = 0,438; a_1 = -2,114; a_2 = 0,916; a_3 = -0,851$

Примечание. R_{rs} – экспериментально измеренные коэффициенты отражения морской толщи в интервале длин волн, центры которых указаны в скобках; a_i – соответствующие коэффициенты регрессий; C_i – концентрации хлорофилла «А», рассчитанные по i -й формуле.

Эмпирические алгоритмы, использующие для вычисления концентрации хлорофилла «А» величины измеренных коэффициентов отражения морской поверхности в более чем двух спектральных полосах, можно найти, например, в [12, 13].

Вышеуказанные двухполосные алгоритмы разрабатывались на основе проведения калибровочных измерений, в которых также определялись значения регрессионных коэффициентов a_i . Выбор алгоритма, а также значения регрессионных коэффициентов зависят от типа морских вод и района, в котором проводятся измерения, и для повышения точности измерения концентрации необходимо предварительно определять значения a_i из подспутниковых измерений, как это сделано, например, в [14, 15]. Особенно это относится к бедным биологическим веществом океаническим водам, с концентрацией хлорофилла «А» менее или порядка 0,05 мкг/л, к арктическим и антарктическим водам, а также к тем шельфовым водам, которые можно отнести ко второму классу. В этих водах указанные алгоритмы

могут давать значительные расхождения с реальными значениями концентраций хлорофилла «А».

В настоящей статье описаны результаты судовых измерений спектров восходящего из морской толщи излучения, которые были проведены одновременно с лазерной флуориметрией морской воды с целью определения применимости предложенных NASA двухполосных алгоритмов для восстановления концентраций хлорофилла «А» в тех районах Тихого океана, где использование двухполосных алгоритмов может вызвать определенные трудности, а именно в водах первого класса, но с содержанием хлорофилла «А» на уровне сотых микрограмма на литр, в антарктических водах и в шельфовых водах второго класса.

2. Описание экспериментальной установки и района работ

Натурные измерения были проведены во время рейса парусного учебного судна «Надежда» Дальневосточной государственной морской академии в период с 10.12.97 по 20.04.98 г. Маршрут судна показан на рис. 1.

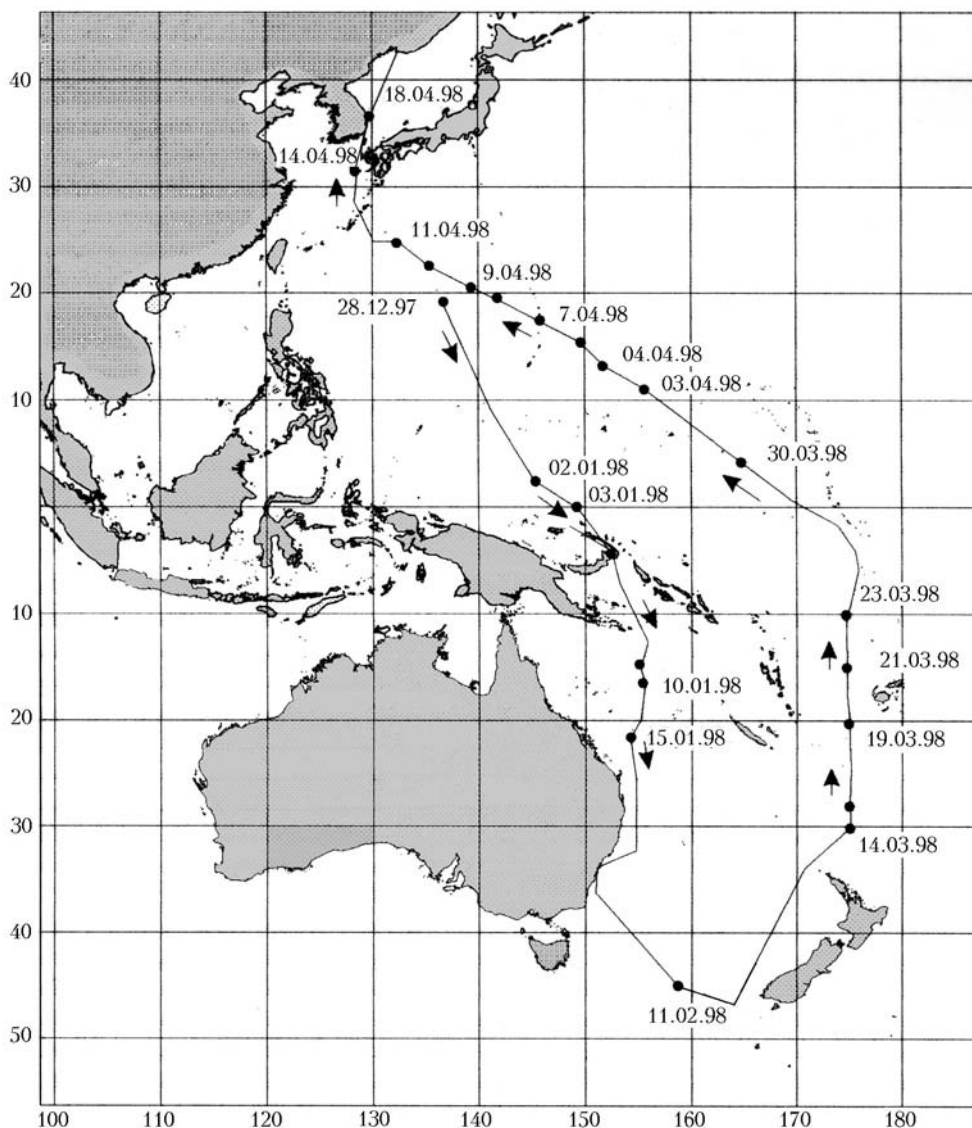


Рис. 1. Схема маршрута судна во время экспедиции

Кружками на рис. 1 обозначены районы, где удалось провести одновременные измерения как спектра восходящего из морской толщи излучения, так и спектров флуоресценции морской воды, по ходу судна. Измерения проводились в дневное время суток, в период с 11.00 до 14.00 ч местного времени. Аппаратурный комплекс состоял из лазерного флуориметра, предназначенного для измерения спектров флуоресценции морской воды, поляризационного спектрометра для измерения спектров восходящего излучения и спектрофотометра для измерения концентрации хлорофилла «А» в пробах морской воды по стандартным методикам. Лазерный флуориметр и поляризационный спектрометр позволяли проводить измерения по ходу судна. Спектры флуоресценции возбуждались в прокачиваемой кювете, схема прокачки и установки поляризационного спектрометра показана на рис. 2.

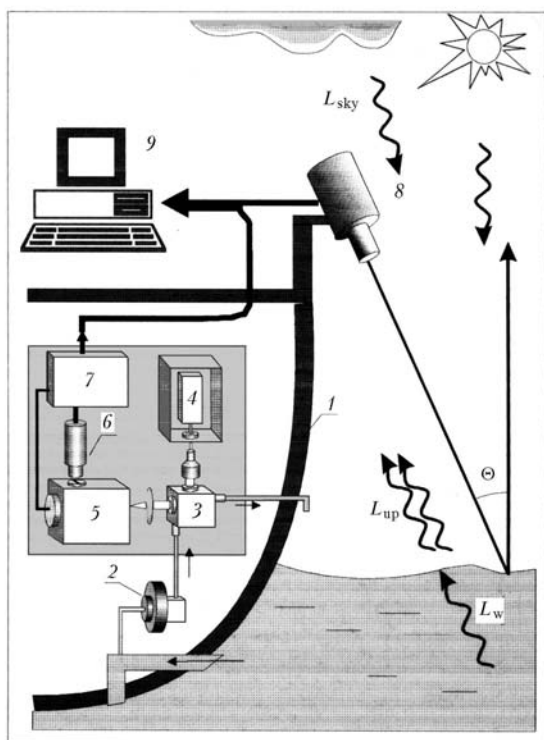


Рис. 2. Схема прокачки воды и измерения спектров флуоресценции морской воды: 1 – корпус судна; 2 – насос для забора морской воды и прокачки ее по пластиковому трубопроводу; 3 – кювета; 4 – лазер; 5 – сканирующий монохроматор; 6 – фотоумножитель; 7 – блок АЦП и системы управления монохроматором; 8 – спектрометр «ПОЛАС»; 9 – компьютер

Для возбуждения спектров флуоресценции использовалась вторая гармоника Nd:YAG-лазера с длиной волны излучения 532 нм, длительность лазерного импульса была порядка 20 нс, энергия лазерного излучения в импульсе не превышала 10 мДж при частоте лазерных импульсов до 10 Гц. Диаметр лазерного пучка увеличивался телескопом до 3 см. Плотность мощности лазерного излучения в кювете составляла порядка 70 кВт/см², что обеспечивало линейный отклик сигнала флуоресценции на лазерное возбуждение. При выполнении этого условия возможно определение концентрации хлорофилла «А» по измерению интенсивности линии флуоресценции на длине волны 675 нм с использованием метода внутреннего репера [16]. Согласно этой методике измерялось отношение интенсивности линии флуоресценции

хлорофилла «А» на длине волны 675 нм к интенсивности линии комбинационного рассеяния воды с центром на длине волны 645 нм (спектральная регистрирующая аппаратура позволяла измерять интенсивность сигнала флуоресценции в диапазоне от 545 до 720 нм с шириной аппаратной функции 4 нм). Данное отношение калибровалось на концентрацию хлорофилла «А», измеренную стандартным методом по спектрам поглощения, в пробах морской воды, которые забирались из прокачиваемой кюветы. Процедура калибровки осуществлялась только тогда, когда можно было ожидать смены видового состава фитопланктона или в районах с сильной пространственной изменчивостью распределения концентрации фитопланктона.

Объем воды в кювете равнялся 250 см³. Прокачка осуществлялась через специальный пластиковый трубопровод, который обеспечивал забор воды с глубины порядка 4 м. Скорость прокачки воды через кювету – 2 л/мин. Пространственное разрешение определялось временем обработки спектра флуоресценции. Для получения всего спектра от 545 до 720 нм при ширине аппаратной функции 4 нм требовалась одна минута. При скорости судна порядка 8 узлов пространственное разрешение составляло 240 м. Пример трех последовательно измеренных по ходу судна спектров приведен на рис. 3, где по горизонтальной оси указаны длины волн в нанометрах, по вертикальной – нормированные интенсивности сигнала флуоресценции. Спектр соответствует средней концентрации хлорофилла «А» порядка 0,4 мкг/л.

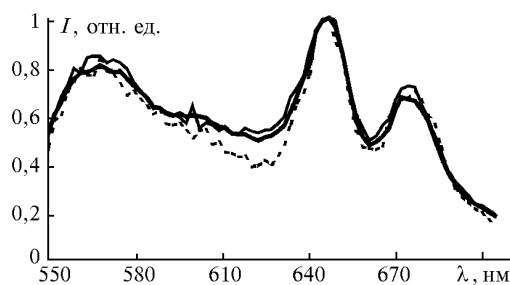


Рис. 3. Спектры флуоресценции морской воды

Измерение спектрального состава восходящего из морской толщи излучения проводилось с использованием поляризационного спектрофотометра «ПОЛАС». Проводились измерения следующих величин: яркости восходящего излучения моря L_{up} , яркости неба L_{sky} , яркости излучения, отраженного от стандартного диффузного рассеивателя L_T , которая определялась один раз в день перед началом серии измерений. На рис. 2 L_w – яркость восходящего излучения под морской поверхностью. Высота установки спектрометра над уровнем моря составляла 7 м, угол θ_n равнялась примерно 45°. Перед входным объективом спектрофотометра располагался поляризатор, который осуществлял регистрацию только P -компоненты восходящего излучения. Такая схема установки прибора обеспечивала минимальный вклад P -компоненты фона неба, отраженного от морской поверхности, в интенсивность восходящего из морской толщи излучения. Ниже приведены характеристики поляризационного спектрометра.

Спектральный диапазон измеряемого сигнала, нм	425–800
Количество сигналов регистрации (вертикальная поляризация) 1	
Количество спектральных каналов	200
Время измерения (200 точек), с	4
Динамический диапазон измеряемого сигнала, дБ	70
Угол поля зрения, град	2
Спектральное разрешение, нм	2

На рис. 4 приведен характерный спектр восходящего излучения, измеренный на спектрометре «ПОЛАС».

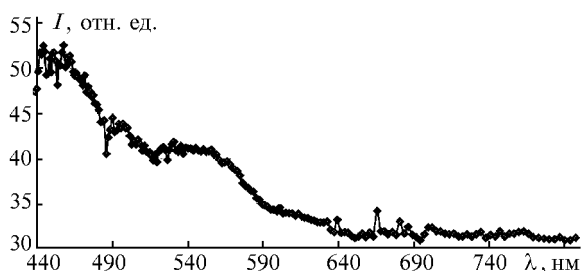


Рис. 4. Пример спектрального распределения восходящего излучения

Наличие большого числа спектральных каналов позволяло применять не только двух- или трехполосные алгоритмы для восстановления концентрации хлорофилла «А», но и использовать методики многоканальной обработки полученных результатов [7]. Ниже приводим только результаты обработки полученных данных по двухполосным методикам.

3. Анализ экспериментальных результатов

Все измерения были проведены в Тихом океане, воды которого в соответствии с их биооптическими характеристиками были разбиты на четыре района. Первые три района относились к оптическим водам первого класса и различались только средней концентрацией фитопланктона. Первый район – бедные органическим веществом воды Тихого океана, близкие к шельфовым водам (на рис. 1 отмечены кружками в период с 28.12.97 по 15.01.98 г.), второй – антарктические воды с большим содержанием фитопланктона (11.02.98 г.), третий – открытые воды Тихого океана (14.03.98 – 11.04.98 г.) и четвертый (в шельфовых водах Японского моря) отнесен нами к водам второго класса (18.04.98 г.). Средние значения концентрации хлорофилла «А» для каждого из районов по данным лазерной флуориметрии составляли соответственно 0,06; 0,3; 0,03 и 0,7 мкг/л.

Данные измерений спектрометра «ПОЛАС» и лазерного флуориметра, полученные в этих районах, подвергались одинаковой предварительной обработке. Они усреднялись по одному и тому же временному интервалу и фильтровались. Затем на полученном таким образом массиве значений R_s проводилось вычисление концентрации хлорофилла «А» с использованием эмпирических соотношений, приведенных в

табл. 1. Временной интервал усреднения 10 мин соответствовал пространственному усреднению порядка 2 км.

За «истинное» значение концентрации хлорофилла «А» в данных районах принимались величины, полученные с помощью лазерной флуориметрии. Концентрации хлорофилла «А», полученные с использованием восьми различных двухполосных алгоритмов, сравнивались с концентрациями, полученными лазерной флуориметрией в том же районе и в те же самые временные интервалы.

При такой величине пространственного усреднения происходит сглаживание флуктуаций значений концентраций, вызванных пятнистой структурой распределения фитопланктона в верхнем приповерхностном слое. Последнее обстоятельство позволяет нам избежать дискуссии относительно разной методики измерения концентрации хлорофилла «А» по спектрам восходящего излучения (в этом случае проводится усреднение по площади морской поверхности, которая попадает в угол поля зрения приемной оптики) и методом лазерной флуориметрии, когда определяется концентрация на глубине порядка 4 м вдоль усредняемого отрезка. Этот вопрос связан с проявлением различных масштабов в пространственных неоднородностях распределения хлорофилла «А» и требует отдельного изучения. Здесь отметим только, что в районах с сильно выраженной пятнистой структурой (второй и четвертый районы) коэффициенты корреляции между кривыми распределения концентрации хлорофилла, построенными по данным лазерной флуориметрии и спектральным измерениям восходящего излучения, сильно зависели от пространственного усреднения и были незначительными при минимальном пространственном разрешении 240 м, что объясняется различным влиянием мелкомасштабной изменчивости в горизонтальном распределении фитопланктона на результаты измерений, которые выполнялись с использованием различных методик.

Для того чтобы оценить, какой из восьми алгоритмов, приведенных в табл. 1, дает значения концентраций, наиболее близкие к значениям, полученным при лазерной флуориметрии, для каждого из районов рассчитывались следующие величины: среднеквадратическое отклонение каждого из восьми значений концентраций, найденных по формулам табл. 1, от значений, полученных при флуориметрических измерениях S_d , средний модуль отклонения M_d , максимальный модуль отклонения Max :

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum(C_{fi} - C_i)^2}{N - 1}}; M_d = \frac{\sum |C_{fi} - C_i|}{N}; Max |C_{fi} - C_i|,$$

Таблица 2

Алгоритм	Район											
	первый			второй			третий			четвертый		
	0,06 мкг/л			0,3 мкг/л			0,03 мкг/л			0,7 мкг/л		
	S_d	M_d	Max	S_d	M_d	Max	S_d	M_d	Max	S_d	M_d	Max
C_1	0,35	0,37	2,05	0,22	0,23	0,86	0,40	0,35	1,73	0,40	0,65	1,41
C_2	0,32	0,37	1,99	0,19	0,21	0,77	0,35	0,35	1,65	0,40	0,58	1,32
C_3	0,34	0,32	1,68	0,24	0,16	0,87	0,39	0,26	1,70	0,53	0,80	1,55
C_4	0,27	0,31	1,09	0,21	0,18	0,92	0,28	0,22	1,26	0,40	0,53	1,15
C_5	0,37	0,29	1,57	0,32	0,19	1,43	0,41	0,22	1,89	0,68	1,04	2,11
C_6	0,23	0,31	0,99	0,19	0,17	0,81	0,26	0,22	1,13	0,37	0,45	1,02
C_7	0,22	0,61	1,48	0,11	0,30	0,62	0,56	0,79	3,05	0,31	0,34	0,93
C_8	0,38	0,45	1,65	0,31	0,34	1,49	0,42	0,33	1,90	0,56	1,09	1,94

где C_{fi} – значения концентраций, которые получены при флуориметрических измерениях; C_i – концентрации, полученные на спектрометре «ПОЛАС»; суммирование проводится по всем измерениям, проведенным в каждом из рассматриваемых районов.

Данные расчетов для четырех районов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, все три параметра имеют большие значения относительно средних концентраций C_{fi} вне зависимости от типа алгоритма. Особенно велики значения максимальных отклонений от величин C_{fi} . Так, на средних концентрациях в сотые микрограмма на литр (первый и третий районы) значения максимальных отклонений доходят до единиц микрограмм на литр. Это подтверждает тот факт, что «глобальные» алгоритмы дают сильно завышенные значения при концентрациях менее 0,05 мкг/л.

Необходимо отметить, что первый и четвертый районы также относятся к экстремальным районам, где алгоритмы $C_1 - C_8$ с вышеуказанными регрессионными коэффициентами дают завышенные концентрации. Полученные данные позволяют построить новые регрессионные соотношения, подобные алгоритмам $C_1 - C_8$. Был проведен подбор коэффициентов для алгоритмов типа $C = 10^{a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3}$, где $R = \log[R_{rs}(490)/R_{rs}(555)]$.

Новые значения коэффициентов a_i и значения S_d , M_d , Max , соответствующие концентрациям, полученным с использованием этих коэффициентов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Район	a_0	a_1	a_2	a_3	S_d	M_d	Max
1	-1,123	0,381	-2,686	0,647	0,03	0,02	0,07
2	0,210	4,032	11,829	11,033	0,05	0,04	0,11
3	-0,714	-2,955	3,775	-1,333	0,02	0,02	0,06
4	0,106	-5,167	39,095	-110,94	0,24	0,21	0,47

Как видно из сравнения табл. 2 и 3, величины S_d , M_d и Max уменьшились в некоторых случаях более чем на порядок при подбore новых регрессионных коэффициентов.

Таким образом, проведенные нами экспериментальные измерения в районах Тихого океана в водах первого класса, с малым содержанием хлорофилла (менее или порядка 0,05 мкг/л), антарктических и шельфовых водах, которые можно отнести ко второму типу, подтверждают, что «глобальные» эмпирические двухполосные алгоритмы могут давать завышенные значения концентраций хлорофилла «А». При измерении концентрации хлорофилла «А» в подобных районах необходим, как минимум, подбор коэф-

фициентов в этих эмпирических алгоритмах. Эти коэффициенты определяются конкретными значениями биооптических характеристик исследуемых вод.

1. *Оптика океана* / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. 370 с.
2. *Ocean Optics* / R.W. Spinrad, K.L. Carder, M.J. Parry. New York: Clarendon press. Oxford, 1994. 283 p.
3. *Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery a review* / H.R. Gordon, and A.Y. Morel. New York: Springer-Verlag. 114 p.
4. *Reports. Phytoplankton Pigments from the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: Comparisons with Surface Measurements* // Science. 1980. V. 210. P. 63–66.
5. *Lee Z.P., Carder K.L., Marra J., Steward R.G., Perry M.J.* Estimating primary production at a depth from remote sensing // Appl. Optics. 1996. V. 35. N 3. P. 463–474.
6. *Hoge Fr.E. and Swift R.N.* Chlorophyll pigment concentration using spectral curvature algorithms: an evaluation of present and proposed satellite color sensor bands // Appl. Optics. 1986. V. 25. N. 20. P. 3677–3682.
7. *Lee Z.P., Carder K.L., Peacock T.G., Davis C.O., Mueller J.L.* Method to derive ocean absorption coefficients from remote sensing reflectance // Appl. Optics. 1996. V. 35. N. 3. P. 453–462.
8. *Chuanmin Hu, Kendall L. Carder, Frank Muller-Karger.* Preliminary algorithm to derive chlorophyll pigment concentration and DOM absorption in turbid coastal waters from SeaWiFS imagery // Proceedings of «The 4th Pacific Ocean Remote Sensing Conference». Qingdao. China. 1998. P. 78–82.
9. *Masanobu Shimada, Hiromi Oaku, Yasushi Motomi et al.* Calibration and validation of the ocean color version-3 product from ADEOS OCTS // J. of Oceanography. 1998. V. 54. P. 401–416.
10. *Prieur L., and Sathyendranath Sh.* An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials // Limnol. Oceanogr. 1981. V. 26. N. 4. P. 671–689.
11. <http://seabass.gsfc.nasa.gov/>
12. *Motoaki Kishino, Takashi Ishumaru, Ken Furuda et al.* In-water algorithms for ADEOS/OCTS // J. of Oceanography. 1998. V. 54. P. 436.
13. *O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B. Greg et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. of Geophys. Res. 1998. V. 103. N. C11. P. 24,937–24,953.
14. *Muller-Karger F.E., McClain C.R., Sambrotto R.N., Ray G.C.* A comparison of ship and Coastal Zone Color Scanner mapped distribution of phytoplankton in the south-eastern Bering Sea // J. Geophys. Res. 1990. N 95. P. 11,483–11,499.
15. *Aiken J., and Moore.* Special requirements for the validation of ocean color information // Proceedings of the WMO/IOC conference on space-based ocean observation. WMO/PD-No. 649. 1995. P. 93–101.
16. *Клышко Н., Фадеев В.В.* Дистанционное определение концентрации примеси методом лазерной спектроскопии по комбинационному рассеянию // ДАН СССР. 1978. Т. 238. С. 320–323.

O.A. Bukin, A.N. Pavlov, M.S. Permyakov, A.Yu. Mayor, O.G. Konstantinov, A.V. Maleenok, S.A. Ogai. **Some Results of Comparison of Chlorophyll «А» Concentrations Obtained by Two Methods at Remote Sensing of Sea Water.**

The results of comparison of the chlorophyll «А» concentrations derived by various two-band algorithms from the upwelling radiation spectra and by the laser-induced fluorescence of sea water are presented. The field experiments were conducted in four regions of the Pacific with different optical properties. The selection of new coefficients in a cubic polynomial algorithm was done on the base of comparison of the laser induced fluorescence and the upwelling radiation spectra measurements.