

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР

№ 5804-В84

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ "СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ РЕКРЕАЦИОННЫХ СИСТЕМ"

УДК 551.463.5

В.Е.Шемпура, Е.А.Агафонов, В.И.Федирко

**ОЦЕНКА СОЛЕНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧЕРНОМОРСКИХ ВОД ПО ДАН-
НЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

В работах [1,2] рассмотрена возможность осуществления численных оценок солености водной поверхности S мелководной северо-западной части Черного моря и прилегающих к ней глубоководных районов по следующим гидрооптическим параметрам: глубине видимости диска Секки (относительной прозрачности) Z_0 , баллу цветности N , определяемому с помощью шкалы Форе-ля-Уле, индексу цвета водной толщи J и эффективной длине волны восходящего из моря излучения $\lambda_{эф}$. Напомним, что величины J и $\lambda_{эф}$ представляют собой отношения: $J = B^{\dagger}(\lambda_n)/B^{\dagger}(\lambda_k)$, согласно [3], и $\lambda_{эф} = \int \Phi^{\dagger}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda / \int \Phi^{\dagger}(\lambda) \cdot d\lambda$, согласно [4]. Здесь $B^{\dagger}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости, измеренная в надир непосредственно под водной поверхностью; длины волн λ_n и λ_k выбирают, как правило, с учетом поглощения света фотосинтетическими пигментами фитопланктона; $\Phi^{\dagger}(\lambda)$ — фотометрическая функция, в качестве которой могут быть $B^{\dagger}(\lambda)$, а также спектральная плотность энергетической облученности $E^{\dagger}(\lambda)$, коэффициенты яркости водной толщи $S(\lambda)$ и диффузного отражения $R(\lambda)$.

Предложенные в [1,2] рабочие формулы носят несколько ограниченный характер и представляет несомненный интерес получение новых зависимостей, справедливых в более общем случае. С этой целью нами был привлечен дополнительный, к использовавшемуся в [2], экспериментальный материал по S , Z_0 и N , собранный в 4 рейсе НИС "Айтодор" (лето 1979 г.) и в 12 рейсе НИС "Профессор Колесников" (осень 1985 г.) — на 33 станциях. В результате проведенного корреляционного анализа выявлены наиболее оптимальные уравнения, связывающие S с Z_0 и N :

$$S = 18,71 - 12,42 \cdot Z_B^{-1} \quad (1)$$

($n = 154$, $r = -0,93 \pm 0,01$, $2 \leq Z_B \leq 24$ м, $11,94 \leq S \leq 18,60$ ‰, $S_{\text{регр.}} = 6y \cdot \sqrt{1-r^2} = 0,37$ ‰) и

$$S = 19,61 - 0,32 \cdot N \quad (2)$$

($n = 154$, $r = -0,88 \pm 0,02$, $3 \div 4 \leq N \leq 19$, $11,94 \leq S \leq 18,60$ ‰, $S_{\text{регр.}} = 0,47$ ‰). Здесь n - объем выборки, а r - коэффициент корреляции при 95%-ной доверительной вероятности. Однако, статистически более надежным является уравнение множественной регрессии:

$$S = 18,95 - 9,96 \cdot Z_B^{-1} - 0,07 \cdot N \quad (3)$$

при $\bar{r} = 0,94$. На рис. 1,2 представлены зависимости $S = f(Z_B)$ и $S = f(N)$, где сплошные линии - графические изображения выражений (1) и (2).

Для проверки полученного результата был использован экспериментальный материал, не вошедший в исходные числовые массивы. Соответствующие измерения проводились в 3 (весна 1982 г.) и 12 (осень 1985 г.) рейсах НИС "Профессор Колесников", 23 рейсе (осень 1980 г.) НИС "Академик Вернадский" и 43 рейсе (осень 1984 г.) НИС "Михаил Ломоносов" - всего на 69 станциях. При этом $15,705 \leq S \leq 18,29$ ‰, $3,5 \leq Z_B \leq 21$ м, $4 \leq N \leq 15 \div 16$. Степень расхождения между измеренными $S_{\text{изм.}}$ и рассчитанными $S_{\text{расч.}}$ по (1)-(3) значениями солености водной поверхности оценивалась по абсолютной ΔS , ‰ и относительной δS , % погрешностям. В таблице I приведены их максимальные, минимальные и средние значения для различных алгоритмов восстановления S . В качестве иллюстрации на рис. 3 даны величины $S_{\text{изм.}}$ и $S_{\text{расч.}}(Z_B, N)$, рассчитанные по (3).

В ряду актуальных задач спутниковой гидрофизики важное место занимает проблема дистанционного определения основных гидрологических характеристик вод природных водоемов. Если измерения температуры поверхности моря успешно осуществляются по состоянию излучения в инфракрасном и микроволновом диапазонах, то иначе обстоит дело с поверхностной соленостью.

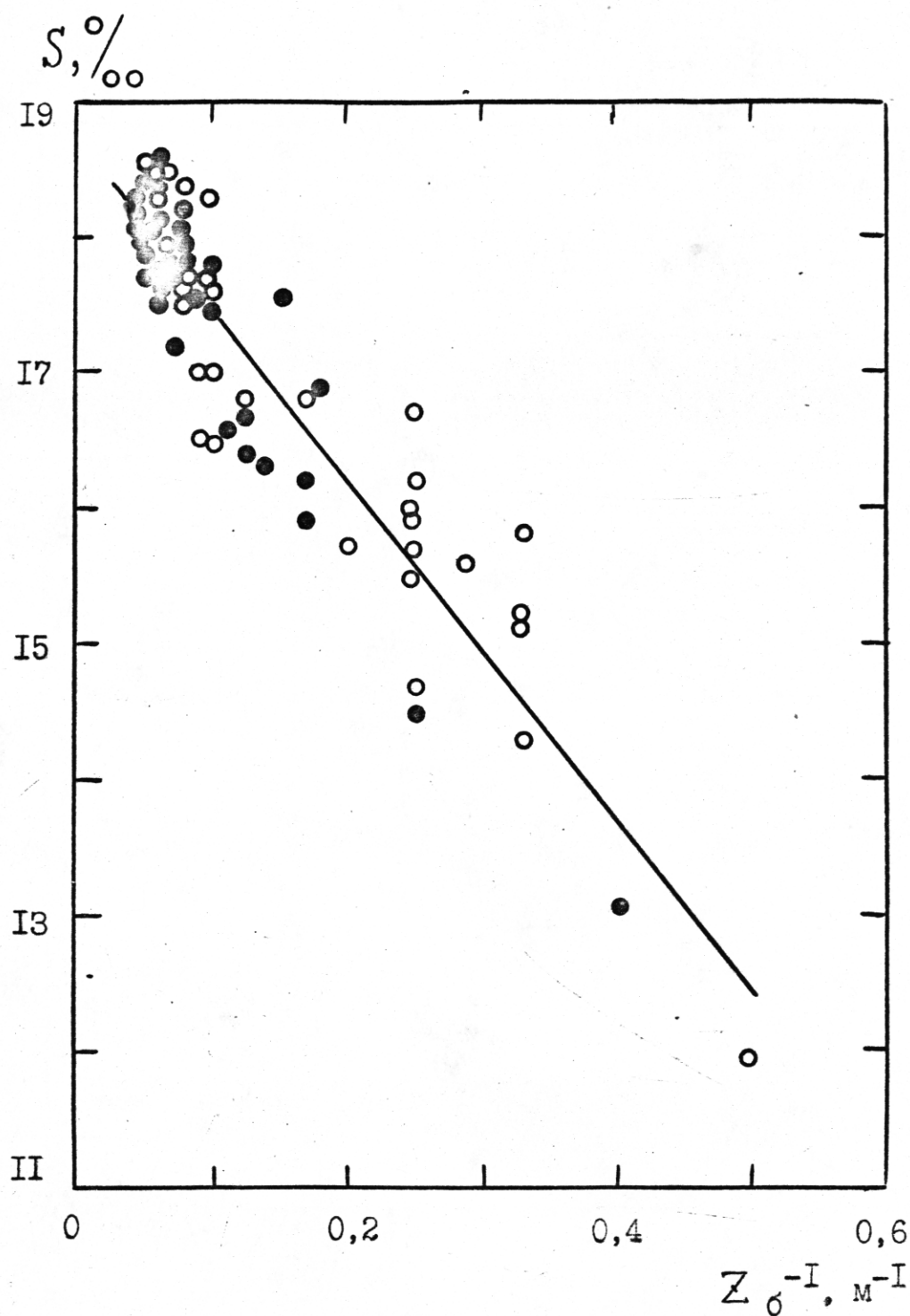


Рис. I

Зависимость солености водной поверхности $S_{‰}$ от глубины видимости диска Секки Z_{δ} , м: $\circ$ - данные 4 рейса НИС "Айтодор" (лето 1979г.) и 12 рейса НИС "Проф. Колесников" (осень 1985г.) $\bullet$ - данные [2]

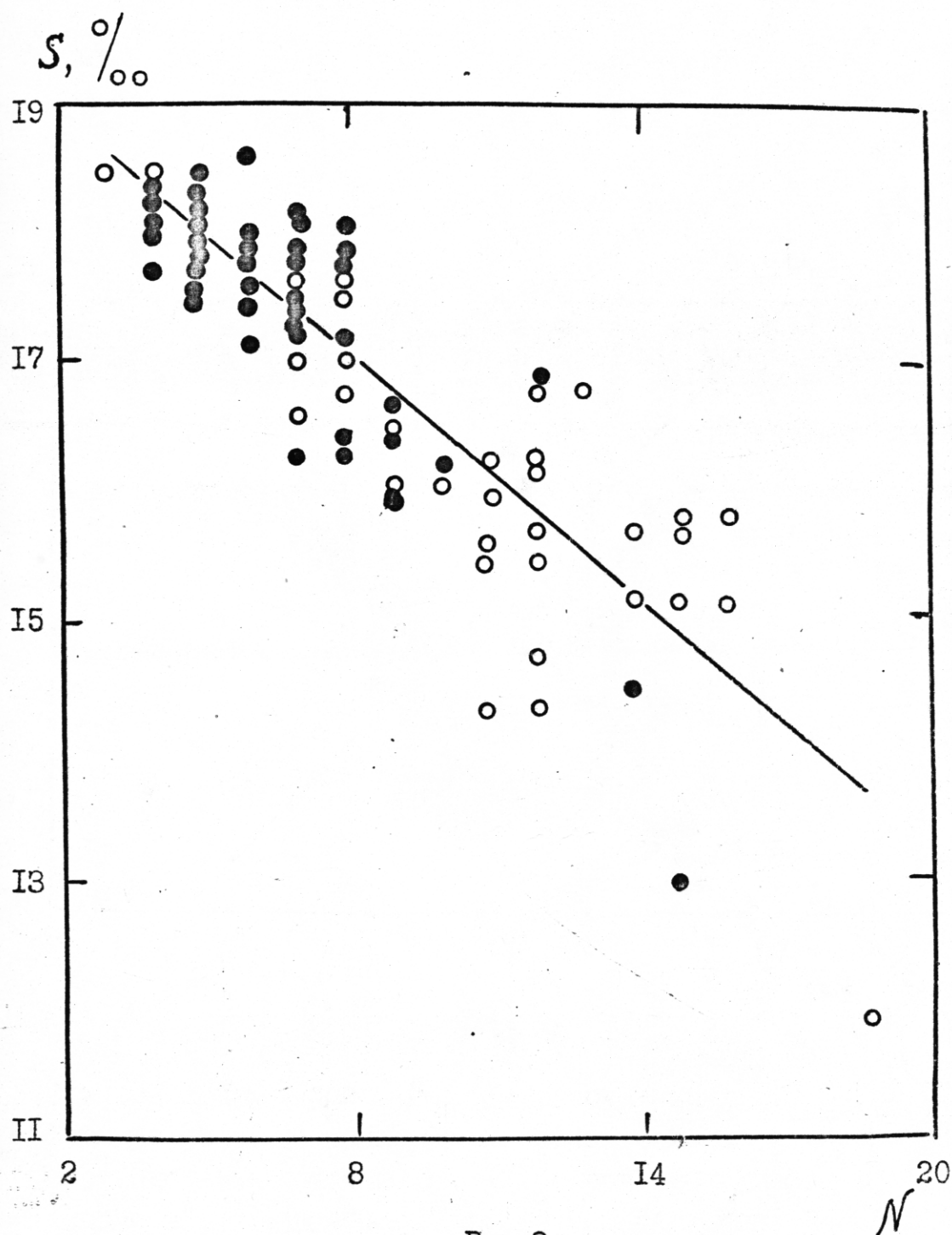


Рис.2

Зависимость солености водной поверхности $S, ‰$ от балла цветности по шкале Фореля-Уле N (обозначения аналогичны таковым на рис.1)

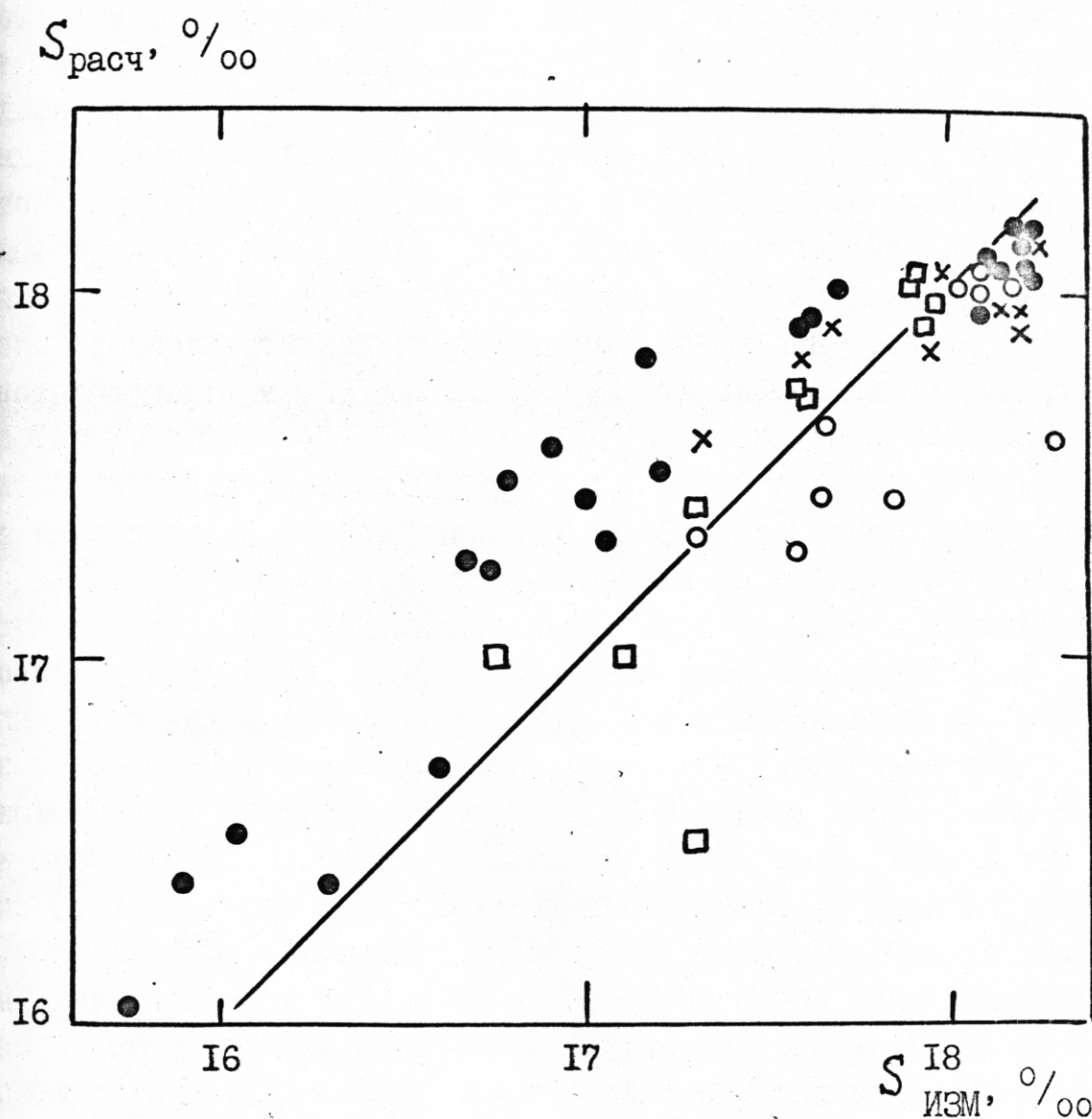


Рис.3

Сравнение измеренных $S_{изм}$ и рассчитанных $S_{расч}$ по формуле (3) значений поверхностной солености: ○, ● - соответственно данные 3 и 12 рейсов НИС "Проф. Колосников", x - данные 23 рейса НИС "Академик Вернадский", □ - данные 43 рейса НИС "Михаил Ломоносов"

К сожалению, пока не существует достаточно надежных методик дистанционного определения S . Тем не менее, иногда даже визуально можно различать распресненные воды на фоне более соленых, и наоборот. Об этом свидетельствуют наблюдения космонавтов над шельфовыми зонами морей и приустьевыми участками впадающих в них рек. На видеоизображениях, принятых со спутника "Метеор", хорошо просматриваются положение и изменчивость границы распространения распресненных вод в зоне основного черноморского течения [5]. По материалам съемок акватории залива Сан-Франциско с ИСЗ "Landsat" была получена простая эмпирическая зависимость между S и спектральной интенсивностью видеосигнала в трех каналах [6]. Анализ экспериментальных данных показывает, что согласованное распределение полей поверхностной солености и гидрооптических свойств объясняется косвенными причинами. Генезис вод различной солености обуславливает в них неодинаковое содержание взвешенных и растворенных веществ, в том числе терригенного и биологического происхождения. Поэтому, в оптимальных условиях можно различать воды разной солености и даже оценивать ее численное значение по характеристикам спектров восходящего из моря излучения. Но даже при благоприятных обстоятельствах не всегда удастся решить успешно задачу из-за несоответствия спектральных каналов измерительной аппаратуры диапазону наибольшей изменчивости оптических свойств вод. В одних случаях вариации солености лучше проявляются в сине-зеленой области спектра, в других - в более длинноволновой области. Следовательно, универсальный подход к решению задачи может базироваться на использовании интегральных параметров излучения, которые всегда чувствительны к изменениям спектрального состава восходящего излучения и могут быть зарегистрированы дистанционно. Таким параметром и является эффективная длина волны $\lambda_{\text{эф}}$, характеризующая собственный цвет моря и тесно связанная с большинством известных гидрооптических и некоторыми биологическими характеристиками морских вод [4, 7-9]. На основе уравнений (21) и (22) из работы [4] запишем:

$$Z_6 = 1,15 \cdot [\exp(4,23 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda_{\text{эф}} - 23,07)]^{-1} \quad (4)$$

$$(459 \leq \lambda_{\text{эф}} \leq 521 \text{ нм})$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ рассчитывались по результатам контактных измерений в спектральном диапазоне $400 \leq \lambda \leq 600 \text{ нм}$. Подставляя выражение (4), справедливость которого была проверена в [8], в (1), получим:

$$S = 18,71 - 10,80 \cdot \exp(4,23 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda_{\text{эф}} - 23,07) \quad (5)$$

При наблюдении акватории с борта судна или низко летящего самолета воспринимаемое излучение, по-видимому, будет сохранять эффективную длину волны, обусловленную селективностью морской воды, поскольку на излучение, восходящее из водной толщи, накладывается отраженный границей раздела вода-воздух белый свет. Тогда становится возможным использования соотношения (5) для прогнозирования поверхностной солености по данным дистанционного зондирования моря. В подтверждении этого воспользуемся результатами судовых измерений, выполненных в 43 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" и 4,12 рейсах НИС "Профессор Колесников". Расчет $\lambda_{\text{эф}}$ осуществлялся по спектральным коэффициентам яркости водной толщи $\rho(\lambda)$ (контактные измерения, 4 рейс) и моря $\rho_m(\lambda)$ (неконтактные измерения, 43 и 12 рейсы), а также спектральным яркостям моря $B_m^{\uparrow}(\lambda)$ (неконтактные измерения, 12 рейс). Предварительная запись спектров $B^{\uparrow}(\lambda)$ и $B_m^{\uparrow}(\lambda)$ проводилась с помощью телефотометров СПРУТ-2 [10] (4 рейс), СПРУТ-3 [1] (12 рейс) и СПЕКТР-1 [12] (43 рейс), которые устанавливались в носовой части судна. При регистрации $B^{\uparrow}(\lambda)$ использовался десятиметровый световод, один торец которого заглублялся не более, чем на один метр, а другой был состыкован с входным зрачком прибора [10]. Прямой расчет зависимости между поверхностной соленостью и $\lambda_{\text{эф}}$ дает следующее уравнение регрессии:

$$S = 43,50 - 5,31 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda_{\text{эф}} \quad (6)$$

где $n = 61$, $r = -0,85 \pm 0,04$; $15,70 \leq S \leq 18,26\text{‰}$; $477,1 \leq \lambda_{\text{эф}} \leq 517,4 \text{ нм}$. Как оказалось, в рассмотренных диапазонах измерения S и $\lambda_{\text{эф}}$ расхождение между формулами (5) и (6) незначительно (см. рис. 4). Погрешности оценок поверхностной со-

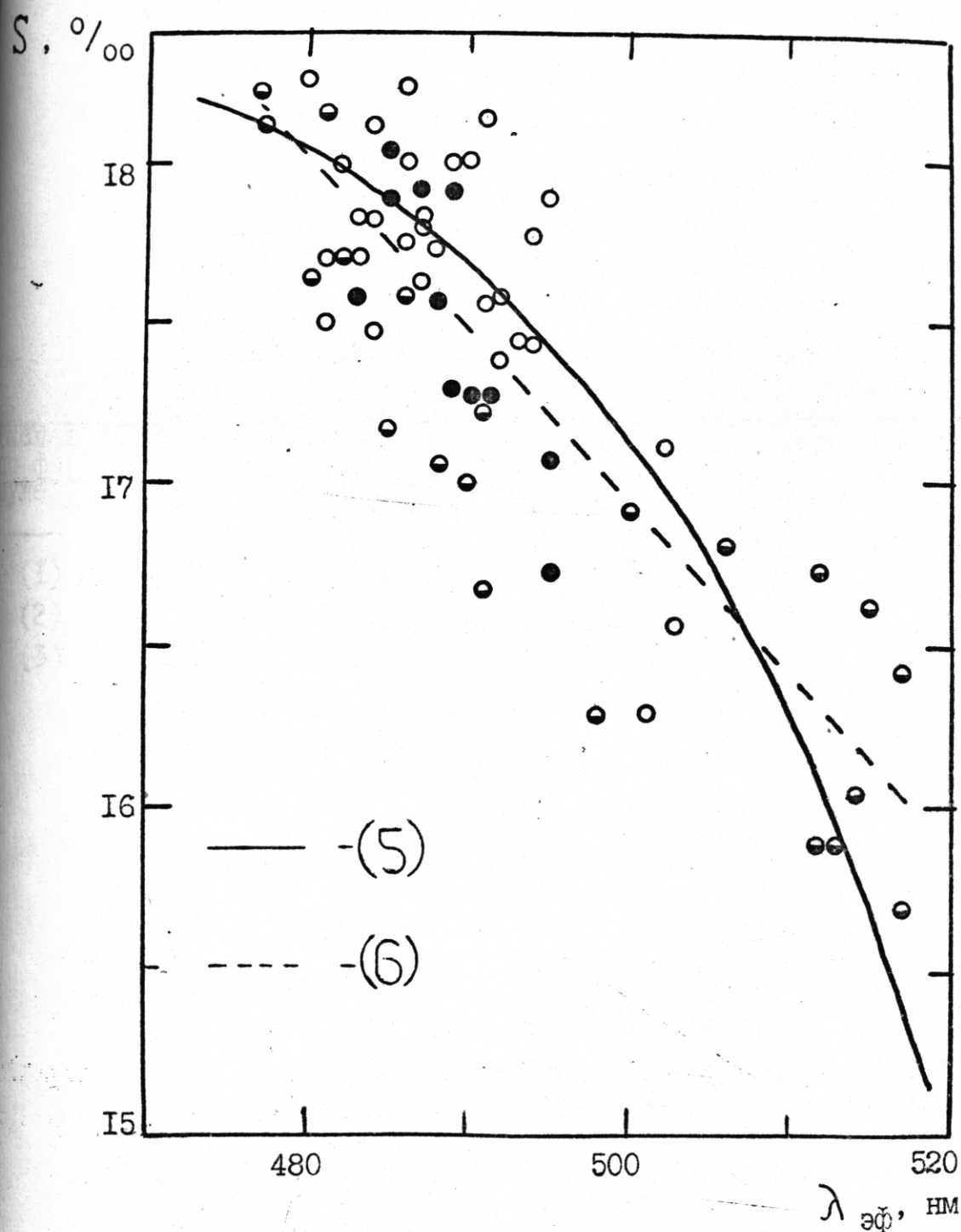


Рис.4

Зависимость между S и эффективной длиной волны восходящего из моря излучения $\lambda_{\text{эфф}}$, нм: $\circ$ - данные контактных измерений (4 рейс НИС "Проф. Колесников"); $\bullet, \bullet$ - данные дистанционных измер. (43 р. НИС "М. Ломоносов", 12 р. НИС "Проф. Колесников" соответственно)

Таблица I

Величины абсолютных и относительных погрешностей для различных алгоритмов восстановления поверхностной солености (по данным 3 и I2 рейсов НИС "Профессор Колесников", 23 рейса НИС "Академик Вернадский", 43 рейса НИС "Михаил Ломоносов")

Расчет по формуле	Величины $\Delta S, ‰$			Величины $\delta S, \%$		
	максимальные	минимальные	средние	максимальные	минимальные	средние
(1)	0,77	0	0,27	4,7	0	1,6
(2)	1,80	0,01	0,30	10,5	0,1	1,7
(3)	0,89	0,01	0,23	5,6	0,1	1,2

Таблица 2

Сравнение абсолютных и относительных погрешностей, полученных при расчете поверхностной солености по данным контактных (формула (3)) и дистанционных (формула (5)) оптических измерений (материалы I2 рейса НИС "Профессор Колесников" и 43 рейса НИС "Михаил Ломоносов")

Расчет по формуле	Величины $\Delta S, ‰$			Величины $\delta S, \%$		
	максимальные	минимальные	средние	максимальные	минимальные	средние
(3)	0,89	0,03	0,31	5,6	0,2	1,9
(5)	0,96	0,01	0,39	5,8	0,1	2,3

Таблица 3

Сравнение значений поверхностной
солености, рассчитанных по самолетным
данным (уравнение (5)), с измеренными
на судне

№ станции	$S_{\text{изм}}, \text{‰}$	Самолет		
		Высота, км :	λ эф, нм :	$S_{\text{расч.}}, \text{‰}$
554	18,32	3,0	493,2	17,52
555	17,67	"	491,1	17,62
556	17,51	"	492,1	17,58
557	17,19	"	491,0	17,63
558	17,14	"	494,7	17,44
559	17,57	"	494,8	17,44
560	17,54	"	493,7	17,50
562	17,76	"	488,0	17,76
563	18,15	6,45	486,8	17,80
564	18,18	"	486,9	17,80
565	18,19	6,72	488,1	17,75

лености по (5) (только для 12 и 43 рейсов) приведены в табл.2, в которой для сравнения находятся также величины ΔS и δS , возникшие при использовании (3). Здесь $15,70 \leq S \leq 18,22^0/00$, $3,5 \leq Z_0 \leq 18,5$ м, $4 \leq N \leq 15+16$, $477,1 \leq \lambda_{\text{эф}} \leq 517,4$ нм, $n = 31$. Как видим, в широких пределах изменения входных параметров уравнение (5) дает результаты близкие к (3) при абсолютной погрешности ΔS не превышающей $1^0/00$.

При определении поверхностной солености по данным дистанционного зондирования моря с больших высот следует учитывать мешающее действие атмосферы. Однако эта проблема имеет самостоятельное значение и выходит за рамки настоящей работы. Тем не менее, при анализе данных квазисинхронных самолетных и судовых измерений, выполненных осенью 1983 г. (7 рейс НИС "Профессор Колесников"), выяснилось, что использование формулы (5) дает приемлемые результаты в случае фотометрирования морской поверхности даже с высот до семи километров (см.табл. 3). Здесь величины $\lambda_{\text{эф}}$ рассчитывались по яркостям $B_M^{\uparrow}(\lambda)$, измеренным в надир с помощью прибора [10] с борта самолета-лаборатории АН-30. Материалы по $B_M^{\uparrow}(\lambda)$ для последующей обработки отбирались исходя из условий отсутствия облачности в поле зрения прибора и минимальных углов крена и рыскания самолета. Поскольку наиболее трудноучитываемые атмосферные эффекты, зашумляющие дистанционный сигнал, происходят в приводном слое толщиной несколько километров, можно надеяться на благоприятный результат зондирования моря и с больших высот. Однако сделать об этом окончательный вывод пока не представляется возможным, что обусловлено рядом причин. Одна из них - недостаточная статистическая обеспеченность данных космических съемок, выполненных при соответствующем подспутниковом обеспечении.

В заключение отметим следующее:

I. При проверке полученных рабочих соотношений брались данные, соответствующие различным гидрологическим сезонам и различным районам Черного моря, в ряде случаев отстоящих на значительное расстояние от северо-западной части. Возникающие

при этом сравнительно небольшие погрешности говорят об устойчивости изучаемых связей и о своего рода их "универсальности" для всего черноморского бассейна.

2. В данном сообщении для корреляционного анализа брались только поверхностные значения солености, в то время как величины Z_0 , N и $\lambda_{эф}$ определяются некоторой водной толщей. Возможно, что рассмотрение усредненной по глубине (хотя бы по Z_0) солености привело бы к более точным оценкам прогнозируемого параметра.

3. Методы оценки S по предлагаемым формулам обладают рядом достоинств: сравнительной простотой, возможностью проводить измерения как на станциях, так и на ходу судна, а также с борта самолета-лаборатории. Все это дает основание рекомендовать их для широкого использования при экспресс-анализе прибрежных черноморских вод, особенно важном для решения задач, связанных с мониторингом северо-западной части Черного моря.

4. С практической точки зрения представляет интерес возможность оценки значений оптических параметров по значению солености исследуемого региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров В.Л. Взаимосвязь индекса цвета и поверхностной солености отдельных районов Атлантического океана. - В сб. Оптика моря и атмосферы. Тезисы докладов (октябрь 1984 г., Батуми), Л.: изд.ГОИ, 1984, с.25-26.
2. Шемшур В.Е., Агафонов Е.А., Федирко В.И. Взаимосвязь гидрологических и гидрооптических характеристик в прибрежной зоне Черного моря. - Деп. в ВИНТИ, 1985, рег. № 4317-85 Деп., 20 с.
3. Jerlov N.G. Significant relationships between optical properties of the sea. - In: Optical Aspects of Oceanography. N.Y.: Acad. press, 1974, p. 77-99.
4. Шемшур В.Е., Афонин Е.И., Урденко В.А. Статистические связи между некоторыми параметрами светового поля в морской воде. Ч.1. Результаты контактных измерений. - Деп. в ВИНТИ, 1984, рег. № 110-84 Деп., 35 с.

5. Природа Земли из космоса (под ред. Козлова Н.П. - Л.: Гидрометеиздат, 1984, 150 с.
6. Jerlov N. G. Remote Sensing of Salinity in the San Francisco Bay Delta. - Remote Sens. Environ., 1982, 12, No. 1, p. 15-22.
7. Урденко В.А., Шемшур В.Е. Универсальный параметр восходящего из моря излучения в видимой части спектра. - в сб.: Проблемы исследования океана из космоса. Севастополь: изд. МГИ АН УССР, 1984, с. 52-65.
8. Шемшур В.Е. Оценка поверхностных концентраций хлорофилла "а" и сестона по цвету морских вод. - Деп. в ВИНТИ, рег. № 4316-85 Деп., 18 с.
9. Шемшур В.Е. Об оптической классификации морских и океанских вод по спектрам восходящего излучения. - Деп. в ВИНТИ, рег. № 2116-85 Деп., 22 с.
10. Афонин Е.И., Шемшур В.Е. Телефотометр для измерения спектральной яркости выходящего из моря видимого излучения. - В сб.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Тезисы докладов. Таллин: изд. АН ЭССР, с. 264-267.
11. Афонин Е.И., Кравцов Г.Л. Телефотометр видимого диапазона для дистанционных исследований поля яркости восходящего из моря излучения. - В сб.: Проблемы исследования океана из космоса. Севастополь: изд. МГИ АН УССР, 1984, с. 74-84.
12. Афонин Е.И., Ли М.Е. Телефотометр для измерения яркости природных объектов в видимом диапазоне спектра. - В кн.: Фотометрия и её метрологическое обеспечение. Тезисы докладов, М.: изд. ВНИИОФИ, 1984, с. 115.
13. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы (под ред. Урденко В.А. и Циммермана Г. - Изд. ИКИ АН ГДР, 1985, 276 с.