

В.Н. Пелевин¹, О.И. Абрамов², Г.Г. Карлсен², В.В. Пелевин¹, А.М. Стогов¹,
Д.В. Хлебников¹

Лазерное зондирование поверхностных вод Атлантики и морей, омывающих Европу

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² ГИЦ РФ «Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина», г. Москва

Поступила в редакцию 8.02.2001 г.

Представлены результаты зондирования моря с борта судна ультрафиолетовым лазером. Измерительная аппаратура и метод разработаны в ИО РАН и ГИЦ РФ ВЭИ. Приборные константы определялись калибровкой.

Получены соотношения, связывающие сигналы КР, флуоресценцию нефтепродуктов и хлорофилла в разных регионах спектра и энергию лазерного импульса с концентрацией растворенного органического вещества и нефтепродуктов (РОВН), концентрацией хлорофилла и значением оптического индекса типа вод. По результатам измерений построены карты распределения концентраций нефтепродуктов и хлорофилла по маршруту экспедиций.

Задача исследования распределения в приповерхностных водах океана светопоглощающих и светорассеивающих примесей представляет большой интерес для океанологии и, в частности, для оценки экологического состояния и загрязненности морских вод антропогенными веществами, прежде всего нефтепродуктами. Среди различных методов измерений особенно перспективны методы лазерного зондирования моря с борта без остановки судна, которые позволяют проводить «попутные измерения» в самых различных рейсах – пассажирских, грузовых, исследовательских и пр. Измерения (не требующие остановки судна), сопровождающиеся взятием проб на ходу для последующего лабораторного анализа, были организованы в 53-м рейсе НИС «Академик Курчатов» вокруг Европейского континента (1994). Работы этого типа проводились также в 26-м рейсе НИС «Витязь» в Атлантическом океане (1991).

Метод зондирования моря с борта судна ультрафиолетовым лазером и аппаратура разработаны совместными усилиями ИО РАН и ГИЦ РФ ВЭИ. Размещенный на палубе судна лидар с длиной волны возбуждения 347 нм индуцировал комбинационное рассеяние морской воды вблизи 397 нм, флуоресценцию растворенного органического вещества естественного происхождения (yellow substance) и нефтепродуктов (далее в тексте РОВН) на длинах волн 400 – 560 нм и флуоресценцию хлорофилла фитопланктона при 685 нм. Лидар описан в [1], там же даны предварительные результаты его использования в подспутниковом эксперименте в 53-м рейсе НИС «Академик Курчатов».

Проводились многочисленные эксперименты по лазерному зондированию моря с целью определения оптических свойств воды, концентраций хлорофилла

фитопланктона, растворенного органического вещества и нефтяных углеводородов методами лазерной локализации начиная с 70-х гг. [2–6 и др.] Все предложенные флуоресцентные методы основаны на нормировании сигналов флуоресценции примесей на сигнал комбинационного (Рамановского) рассеяния (КР) непосредственно воды. Наши измерения показали и расчеты подтвердили (см. ниже), что сигналы КР при зондировании полубесконечной водной среды не являются стабильными, а сильно зависят от типа самой воды (ее трофности, загрязненности и пр.), меняясь до 10 и более раз в разных океанских акваториях. Поэтому сигнал КР, без учета прочих характеристик водной массы, не может служить «опорным» сигналом, пригодным для нормировки. Это привело к необходимости создания новой теории и нового алгоритма обработки данных зондирования моря с борта судна. Изложим вывод расчетных формул.

Пусть на поверхность моря вертикально падает короткий световой лазерный импульс энергии N_0 при длине волны λ_0 . Сделаем несколько предварительных предположений, упрощающих задачу.

Предположим среду вертикально однородной в пределах слоя, формирующего флуоресцентный отклик. Это основано на том, что слой ветрового перемешивания в открытом море почти всегда толще слоя, формирующего флуоресцентный отклик. Будем считать, что спектральное ослабление энергии импульса, достигшего глубины z , происходит в соответствии с закономерностью, найденной для поля солнечного излучения, т.е. соответствует оптической классификации, разработанной в [7], с уточненными коэффициентами, приведенными в [8]. Подчеркнем, что здесь мы имеем в виду энергию импульса N , достигшую глубины z ,

независимо от того, расплывается импульс в поперечном и продольном направлениях или нет. Предположим также, что формирование обратного сигнала происходит в соответствии с двухпотоковым приближением [8].

Исходя из сделанных предположений, можно представить, что слой воды толщиной dz , расположенный на глубине z , освещен световым импульсом энергии

$$N = N_0 \exp(-\alpha_{\lambda_0} z) \quad (1)$$

и в нем формируется сигнал комбинационного рассеяния, равный

$$dN = N_0 \exp(-\alpha_{\lambda_0} z) \gamma dz, \quad (2)$$

где α_{λ} – показатель вертикального ослабления света средой при длине волны λ , в иностранной литературе этот показатель часто обозначается символом K_d ; γ – константа комбинационного рассеяния света водой.

К поверхности и далее к фотоприемнику, практически совмещенному с лазером и расположенному на борту судна на некоторой высоте над поверхностью, от слоя воды ($z, z + dz$) приходит импульс КР, равный

$$dN = N_0 \exp[-(\alpha_{\lambda_0} + \alpha_{\lambda_1}) z] \gamma G dz, \quad (3)$$

где λ_1 – длина волны КР; G – геометрический фактор, зависящий от высоты лидара над поверхностью и апертуры приемника, но неизменный для данной аппаратуры, судна и места размещения лидара у борта. Предполагается, что угловая апертура приемника охватывает полностью ту часть водной поверхности, через которую выходит из моря сигнал КР.

Полную энергию импульса комбинационного рассеяния $N_{\text{КР}}$, принятую фотоприемником на борту от водной среды, после интегрирования вкладов от всех слоев по глубине можно записать в виде

$$N_{\text{КР}} = \int_0^{\infty} N_0 \exp[-(\alpha_{\lambda_0} + \alpha_{\lambda_1}) z] \gamma G dz = N_0 \gamma G (\alpha_{\lambda_0} + \alpha_{\lambda_1})^{-1}. \quad (4)$$

В использованном лидаре $\lambda_0 = 347$ нм, поэтому $\lambda_1 = 397$ нм, и в нашем случае:

$$N_{\text{КР}}/N_0 = A (\alpha_{347} + \alpha_{397})^{-1}, \quad (5)$$

где $A = \gamma G$ – константа для данной аппаратуры и судна, т.е. сохраняется неизменной в течение всей конкретной экспедиции.

Используя зависимость $(\alpha_{347} + \alpha_{397})$ от α_{500} в соответствии с названной выше классификацией [7] и уточненные коэффициенты, приведенные в [8], получим эмпирическую формулу:

$$\alpha_{347} + \alpha_{397} = 4,1 \alpha_{500} - 0,06. \quad (6)$$

Так получается простой метод неконтактной оценки оптического индекса типа вод m . Напомним, что m по определению есть безразмерная величина, пропорциональная α_{500} [7]:

$$m = k \alpha_{500}, \quad (7)$$

где α_{500} – показатель вертикального ослабления солнечного излучения (м^{-1}) при длине волны 500 нм; $k = 43,43$ м.

Измеряя при зондировании моря $N_{\text{КР}}$ и N_0 и зная калибровочный коэффициент A , легко получить индекс типа вод m , пользуясь последовательно выражениями (5) – (7) и данными таблицы.

Значения показателя вертикального ослабления света, м^{-1} , в морских водах в зависимости от индекса типа вод m

m	α_{500}	α_{347}	α_{397}	α_{439}	α_{685}	ψ_1	ψ_2
1,2	0,027	0,033	0,024	0,021	0,48	0,95	9,08
1,5	0,034	0,050	0,036	0,032	0,49	0,94	6,26
2,0	0,046	0,073	0,055	0,049	0,50	0,94	4,44
3,0	0,069	0,138	0,10	0,087	0,51	0,93	2,71
4,0	0,092	0,178	0,13	0,12	0,53	0,93	2,29
5,0	0,12	0,230	0,17	0,15	0,55	0,93	1,94
6,0	0,14	0,29	0,21	0,19	0,57	0,93	1,79
7,0	0,16	0,34	0,26	0,23	0,59	0,93	1,55
8,0	0,18	0,39	0,30	0,26	0,61	0,93	1,45
9,0	0,20	0,44	0,33	0,30	0,63	0,93	1,38

Но константу A чрезвычайно трудно рассчитать из условий опыта, поэтому значение A определяется на выбранной «калибровочной» станции (либо на нескольких станциях вдоль маршрута), где хорошо известно значение m . В 53-м рейсе для калибровки было выбрано Ионическое море, где значение индекса оптического типа вод $m = 1,59$ было найдено иными измерениями. Через $N_{\text{КР}}/N_0$, полученное на станциях в Ионическом море, было определено значение A , которое затем использовалось для всего маршрута при расчете типа вод. Далее пользовались формулой

$$\alpha_{347} + \alpha_{397} = [A/(1-p)] [N_0/N_{397}], \quad (8)$$

где p – «пьедестал» (оценка величины p дана ниже).

Расчет сигнала флуоресценции РОВН при длине волны λ проводится по похожей модели; аналогично (4) получается следующая формула для энергии флуоресцентного импульса РОВН при длине волны 439 нм, т.е. выбрана полоса вблизи сильно размытого максимума спектра флуоресценции РОВН при облучении ультрафиолетом $\lambda = 347$ нм:

$$N_{439} = N_0 K_{\text{РОВН } 347} \beta_{347 \rightarrow 439} G (\alpha_{347} + \alpha_{439})^{-1}, \quad (9)$$

где $K_{\text{РОВН } 347}$ – показатель поглощения света растворенной органикой и нефтепродуктами при $\lambda = 347$ нм в данных водах; $\beta_{347 \rightarrow 439}$ – коэффициент переноса поглощенной РОВН энергии к спектральной полосе $\lambda_2 = 439$ нм, в которой высвечена энергия, принятая в соответствующем канале приемника.

Будем оценивать концентрацию РОВН в море и ее изменчивость вдоль траектории судна непосредственно в «единицах светопоглощения» при длине волны 347 нм, т.е. по значениям $K_{\text{РОВН } 347}$, м^{-1} .

Из (5) и (9) получаем следующее выражение для определения $K_{\text{РОВН } 347}$:

$$K_{\text{РОВН } 347} = \frac{\gamma}{\beta_{347 \rightarrow 439}} \frac{(\alpha_{347} + \alpha_{439})}{(\alpha_{347} + \alpha_{397})} \frac{N_{439}}{N_{\text{КР}}} = B \psi_1 \frac{N_{439}}{N_{\text{КР}}}, \quad (10)$$

где $B = \text{const}$; $\psi_1 = (\alpha_{347} + \alpha_{439}) / (\alpha_{347} + \alpha_{397})$ определяется по оптической классификации (см. таблицу).

Теперь определим понятие «пьедестала» p . Это тот уровень энергии сигнала РОВН при $\lambda = 397$ нм, на котором (как на фоне или «пьедестале») лежит энергия КР. Пусть он равен ξN_{439} ($\xi < 1$). Если найти p в долях от N_{397} , то

$$p = (\xi N_{439}) / (N_{\text{КР}} + \xi N_{439}) = \xi (N_{439} / N_{397}); \quad (11)$$

$$N_{\text{КР}} = (1 - p) N_{397}. \quad (12)$$

Далее, подставляя (12) в (10), получаем расчетную формулу

$$K_{\text{РОВН } 347} = B \psi_1 / (1 - p) N_{439} / N_{397}. \quad (13)$$

Алгоритм обработки экспериментальных данных выглядит следующим образом. Вначале по (11) определяем p . По литературным данным [9] оценим ξ величиной $\xi \approx 0,25$. Затем по (13) рассчитаем концентрацию органического вещества естественного происхождения плюс нефтепродуктов в зоне зондирования в оптических единицах м^{-1} – в величинах показателя светопоглощения в УФ-области спектра при $\lambda = 347$ нм.

Перейдем к оценке концентрации хлорофилла по значениям сигнала флуоресценции при $\lambda = 685$ нм. Используем отношение амплитуд сигналов N_{685} / N_{397} , при этом учтем, что

$$N_{685} / N_{397} = N_{685} (1 - p) / N_{\text{КР}}. \quad (14)$$

Аналогично (4) и (9) можно написать

$$N_{685} = N_0 K_{\text{пигм } 347} \beta_{\text{пигм } 347 \rightarrow 685} G (\alpha_{347} + \alpha_{685})^{-1}, \quad (15)$$

где $K_{\text{пигм } 347}$ – показатель поглощения света пигментами фитопланктона при 347 нм, м^{-1} ; $\beta_{\text{пигм } 347 \rightarrow 685}$ – коэффициент переноса поглощенной пигментами фитопланктона энергии внутри клеток к «красной» спектральной полосе $\lambda = 685$ нм, в которой эта энергия высвечивается.

Естественно положить, что действует закон Бэра:

$$K_{\text{пигм } 347} = K_{\text{пигм } 347}^* C_{\text{хл}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{хл}}$ – концентрация хлорофилла, $\text{мг}/\text{м}^3$; $K_{\text{пигм } 347}^*$ – удельное поглощение пигментами, $\text{м}^{-1} \cdot \text{м}^3/\text{мг}$, т.е. $\text{м}^2/\text{мг}$. Будем рассчитывать концентрацию хлорофилла в $\text{мг}/\text{м}^3$.

Из (4) и (15) с учетом (12) и (16) получаем

$$C_{\text{хл}} = C (1 - p)^{-1} \psi_2 N_{685} / N_{397}, \quad (17)$$

где $C = \gamma / (K_{\text{пигм } 347}^* \beta_{\text{пигм } 347 \rightarrow 685})$ – константа; в нашем случае сделано допущение независимости этой

величины от видового состава планктона и времени суток;

$$\psi_2 = (\alpha_{347} + \alpha_{685}) / (\alpha_{347} + \alpha_{397}). \quad (18)$$

Величины ψ_2 , как и ψ_1 , которые следуют из оптической классификации вод, даны в таблице, где приведена их зависимость от индекса оптического типа вод m . Константа C , как и A , B , определяется экспериментально на нескольких станциях рейса.

Ниже приведем порядок выполнения измерений и расчетов по данным лазерного зондирования вод лидаром описанного выше типа.

1) В водах с известными m , $K_{\text{РОВН } 347}$, $C_{\text{хл}}$ (на калибровочной станции либо станциях) проводится калибровка лидара, состоящая в получении значений констант A , B и C по (5), (13), (17).

2) По маршруту рейса по данным лазерного зондирования рассчитывается «пьедестал» p по (11).

3) По формулам (6) – (8), (13), (17) на основе данных лазерного зондирования, т.е. экспериментальных значений N_0 , N_{397} , N_{439} , N_{685} , рассчитываются вначале оптический тип вод m , затем концентрация РОВН и хлорофилла.

Таким образом, теория построена. Получены формулы, связывающие измеряемые при зондировании моря сигналы КР, флуоресценции РОВН в разных частях спектра и энергию лазерного импульса с искомыми величинами – концентрацией РОВН, концентрацией хлорофилла и значением оптического индекса типа вод m – в линейном приближении, с неизвестными коэффициентами A , B и C . Подчеркнем, что под N_0 , N_{397} , N_{439} , N_{685} подразумеваются не значения этих величин в джоулях, а некие сигналы, пропорциональные им и зарегистрированные линейными приемниками; при этом коэффициенты пропорциональности неизвестны и уходят в калибруемые значения констант A , B и C .

Теоретическое вычисление коэффициентов A , B и C затруднительно, и большой точности таких расчетов ожидать не следует. Поэтому важнейшей задачей является калибровка эколидара в натуральных условиях. Величины A , B и C определялись непосредственно в море, после установки прибора в рабочее положение на борту судна, т.е. в тех же геометрических условиях, что и при измерениях. Калибровка проводилась в водах, где значения m и концентрации $K_{\text{РОВН } 347}$, $C_{\text{хл}}$ известны по другим – прямым измерениям в узаконенных процедурах, адекватных этим характеристикам. Так, концентрация хлорофилла определяется методом ЮНЕСКО на пробах [10], m получается по измерениям светового поля [7], концентрация органики в единицах светопоглощения $K_{\text{РОВН } 347}$ (либо $K_{\text{РОВН } 390}$) измеряется на пробах двухлучевым спектрофотометром с бидистиллатом в кювете сравнения. Знать мощность лидара (энергию импульса) в абсолютных единицах излишне – достаточно отвести малую часть излучения лазера на фоторегистратор и обеспечить линейность регистратора.

В данном случае калибровка эколидара проводилась в водах Ионического моря (определение величины A и B) и в водах Саргассова моря (определение величины C). Значение m Ионического моря составило 1,59.

Калибровочное значение B получалось следующим образом. В 10 районах Ионического моря (на станциях по маршруту экспедиции) измеренные значения N_{439}/N_{397} составили, в среднем, 0,0183 для данного прибора при среднеквадратическом отклонении 0,0028. Нефтепродуктов в этом море, как полагаем, не было. Значения $K_{РОВН\ 347}$ были найдены как разность между $K_{РОВН}$ для воды при $m = 1,59$ путем экстраполяции данных [11], соответственно, $0,027\ м^{-1}$ и табличных данных для чистой морской воды $K_{РОВН\ 347} = 0,011\ м^{-1}$, т.е. $K_{РОВН\ 347} = 0,016\ м^{-1}$. Расчет по (13) с использованием измеренных отношений N_{439}/N_{397} дал значение $B = 0,926$.

Аналогичная процедура, выполненная для однородных районов Саргассова моря, с целью расчета C ($C_{ХЛ}$ определялся на пробах по методу ЮНЕСКО) с использованием (17) дала величину 1,07.

По результатам измерений построены карты, демонстрирующие распределения концентраций РОВН (органического вещества естественного происхождения, т.е. фитопланктона и продуктов его жизнедеятельно-

сти, причем основное количество органики находится в растворенном состоянии – это РОВ плюс антропогенные нефтяные углеводороды) и хлорофилла фитопланктона по маршруту экспедиции. На разрезе Нью-Йорк – мыс Кап-Блан – Лас-Пальмас (рис. 1) концентрация РОВН в оптических единицах – значениях показателя поглощения при длине волны 347 нм – варьировала в пределах от 0,003 (Саргассово море) до $0,92\ м^{-1}$ (Нью-Йоркская бухта), т.е. в 300 раз. Концентрация хлорофилла на этом же разрезе изменялась в пределах от 0,016 (Саргассово море) до $3,3\ мг/м^3$ (в Канарском апвеллинге) – в 200 раз, со среднеквадратическим отклонением от измеряемых на пробах стандартным методом величин 36%. Было отмечено, что концентрация РОВН возрастала к востоку от Срединно-атлантического хребта быстрее, чем концентрация хлорофилла. Возможно, это связано с переносом к западу вод Канарского апвеллинга Северным пассатным течением.

На рис. 2 приведены значения концентрации РОВН в водах морей, омывающих Европу (измерения проведены в 53-м рейсе НИС «Академик Курчатов»). Видим, что воды Балтики, Датских проливов, Северного моря, Ламанша весьма загрязнены. Воды Средиземного моря, за исключением районов вблизи портов, относительно чище.

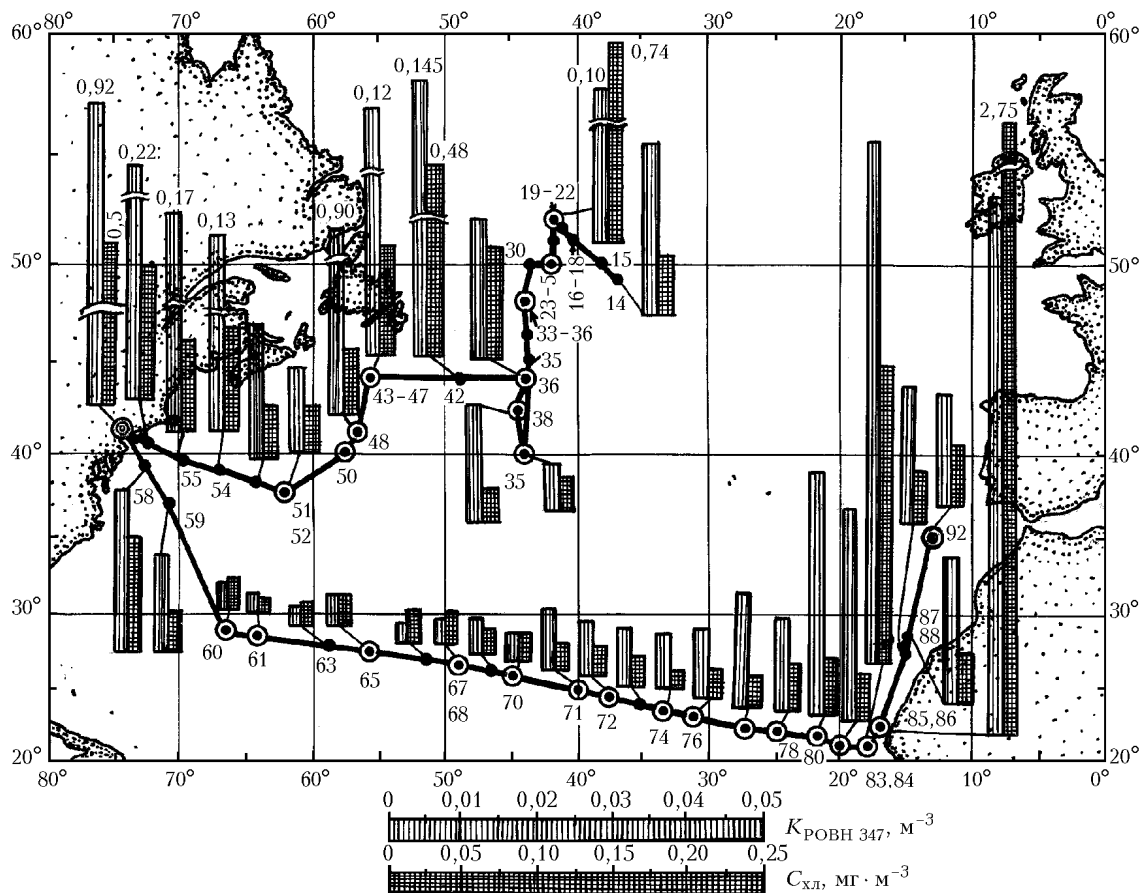


Рис. 1. Концентрации растворенного органического вещества «yellow substance» плюс нефтепродукты $K_{РОВН\ 347}$ и концентрация хлорофилла $C_{ХЛ}$ по измерениям ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром в Северной Атлантике (26-й рейс НИС «Витязь», 1991 г.)

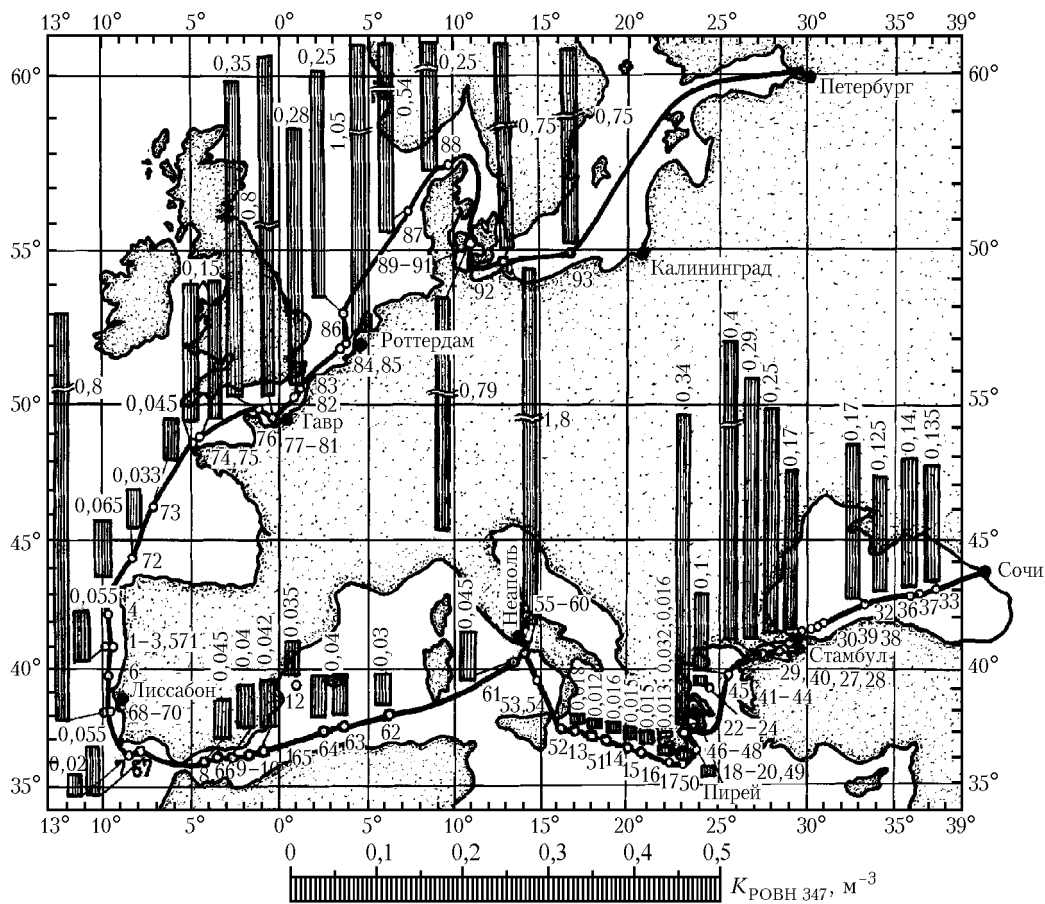


Рис. 2. Концентрации растворенного органического вещества «yellow substance» плюс нефтепродукты $K_{РОВН\ 347}$ и концентрация хлорофилла $C_{ХЛ}$ по измерениям ультрафиолетовым флуоресцентным лидаром в рейсе вокруг Европы (53-й рейс НИС «Академик Курчатов», 1994 г.)

В водах Средиземного моря концентрация РОВН варьировала от 0,01 (Ионическое море) до 1,83 м⁻¹ (Неаполитанский залив). Таким образом, самые загрязненные воды были обнаружены при подходе к порту Неаполь.

Уровень флуоресценции РОВН в водах Мраморного моря превышает таковой для Черного моря, что опровергает предположение, будто Мраморное море загрязняется через Босфор. Скорее, наоборот, проникновение верхнего слоя вод Мраморного моря через Босфор повышает флуоресценцию черноморских вод в юго-западном районе, прилегающем к Турции.

Данные измерений показали также, что флуоресценция РОВН вблизи крупных портов, таких как Нью-Йорк, Неаполь, Роттердам, Стамбул, Пирей, Лиссабон, Гавр, Лас-Пальмас, в десятки и даже сотни раз превосходит естественный уровень флуоресценции морских вод, а значит, концентрация нефтепродуктов в этих водах во много раз превосходит концентрацию светопоглощающей фракции естественной органики, представляющей собой продукт жизнедеятельности фитопланктона.

Предложенная методика и обсужденные результаты указывают на реальную возможность организации морского экологического контроля состояния вод

на обширных акваториях с использованием судового флуоресцентного ультрафиолетового лидара.

1. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г. Подспутниковый эксперимент в Средиземном море: сравнительные исследования загрязненности вод морей, омывающих Европу, средствами лазерного зондирования с борта судна // Инженерная экология. 1995. № 6. С. 31–41.
2. А. с. СССР № 575480. Способ определения гидрохимических и гидробиологических характеристик природных вод / Романов Д.Н., Еремин В.И., Лобов Л.И., Абрамов О.И. и др. 1977.
3. Клышко Д.Н., Фадеев В.В. Дистанционное определение концентраций примесей в воде методом лазерной спектроскопии с калибровкой по компенсационному рассеиванию // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. 320 с.
4. Абрамов О.И., Еремин В.И., Карлсен Г.Г., Половинко В.В. О применении лазерной локации для определения загрязнения поверхности моря нефтепродуктами // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. М.: Наука, 1979. С. 184–187.
5. Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Исследования морской воды в Северной Атлантике судовым лидаром // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 714–722.
6. Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С., Ладбрук Дж., Скотт А. Лазерное зондирование акватории оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 39–45.

7. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. О классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного света // *Океанология*. 1977. Т. 17. № 1. С. 1–15.
8. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности. Гл. 9 // *Явления на поверхности океана*. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 386.
9. Шифрин К.С., Карабашев Г.С. Свечение моря. Биоломисценция и фотоломисценция / Под ред. В.М. Каменковича, А.С. Моница. *Физика океана. I. Гидрофизика океана*. М.: Наука, 1978. С. 356–359.
10. UNESCO. Determination of photosynthetic pigments in sea water. 1966. P. 11–69.
11. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // *Оптика атмосф. и океана*. 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.

V.N. Pelevin, O.I. Abramov, G.G. Karlsen, V.V. Pelevin, A.M. Stogov, D.V. Khlebnikov. **Laser sensing of surface waters in the Atlantic Ocean and European seas.**

The results of the water see sensing with a shipborne UV laser are presented. The instrumentation was worked out at the IL RAS and SSC RF REI. The instrumental constants were determined by calibration.

The relations are found connecting the RS signals, fluorescence of oil products and chlorophyll in various spectral ranges, and the laser pulse energy with the concentration of the oil products, chlorophyll, and magnitude of optical index of the water type. The maps of the concentration distribution along the research expedition routs are constructed.