

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 501.508

В.Г. Бондур, Е.В. Зубков

Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений верхнего слоя океана

ФГУП ЦНИИ «Комета», г. Москва

Поступила в редакцию 3.01.2001 г.

Анализируются основные лидарные методы зондирования загрязнений водной среды и физические эффекты, лежащие в их основе. Перспективность этих методов для мониторинга загрязнений верхнего слоя океана обусловлена возможностью контроля широкого спектра различных полей (физических, химических и биологических). Эффективность предлагаемых лидарных методов подтверждена результатами натурных экспериментов, лабораторных и теоретических исследований.

Введение

В настоящее время особую значимость приобретает проблема мониторинга загрязнений Мирового океана дистанционными методами, среди которых лидарные занимают важное место [1–10]. Различные типы антропогенных воздействий на водную среду вызывают изменение ее параметров, значительная часть которых может быть выявлена и определена с помощью лидаров. Главное преимущество лидарных методов по сравнению с другими дистанционными методами заключается в том, что они позволяют изучать весьма широкий спектр характеристик водной среды в сочетании с такими преимуществами, как возможность невозмущающего контроля, малое время измерений (практическая безынерционность), высокое разрешение по глубине (при обеспечении соответствующих энергетических характеристик лидара), высокая производительность, работа в реальном или близком к реальному масштабам времени.

Указанные преимущества лидарных методов неоспоримы при контроле антропогенных воздействий на экосистемы океана и прогнозе изменений экосистем под влиянием различных факторов, что особенно важно для создания систем мониторинга окружающей среды [8–13].

В данной статье рассматриваются лидарные методы зондирования верхнего слоя океана, которые наиболее эффективны для дистанционного мониторинга загрязнений акваторий морей и океанов.

1. Физические основы лидарных методов исследований океана

Лидарные методы контроля различных параметров водной среды основываются главным образом на использовании эффектов упругого и неупругого взаимодействий излучения с веществом [1–7, 14–18]. Использование этих эффектов в различных комбинациях с другими физическими эффектами, присущими электромагнитному излучению (интерференция, поляризация, эффект Доплера и др.), наряду с применением развитых методов спектроскопии обуславливает существующее многообразие лидарных методов контроля водной среды [1–5, 18, 19].

В случае упругих взаимодействий имеют место процессы рэлеевского рассеяния (на молекулах воды) и рассеяния Ми (на частицах взвеси). При этом информация о характеристиках морской среды содержится в амплитудно-временной структуре импульса обратного рассеяния на несмещенной длине волны зондирующего излучения.

Примером неупругих взаимодействий являются: спонтанное комбинационное рассеяние (СКР), флуоресценция, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) и др. Высокая информативность спектров вторичных излучений позволяет в принципе решить многие задачи диагностики загрязнений водной среды, однако базовая энергетическая характеристика этих процессов – сечение обратного рассеяния – на несколько порядков ниже, чем для упругих взаимодействий. Это ограничивает область применения методов, основанных на эффектах неупругих взаимодействий, из-за ограничений по разрешающей способности и диапазону глубин при реально достижимых уровнях развития энергетики бортовых авиационных лидаров.

Известны также комбинированные методы, основанные на сочетании эффектов упругих и неупругих взаимодействий. Характерным примером является метод нормировки сигналов (рассеяние Ми, флуоресценция) либо парциальных компонент их спектров по сигналу СКР [5, 20].

Лидарные методы зондирования морской среды непосредственно связаны со сложной проблемой решения обратных задач лазерной гидрооптики, когда по откликам на посылку зондирующего импульса требуется определить значение тех или иных гидрофизических характеристик в данном элементарном объеме морской среды. Сложность решения обратных задач определяется наличием множества факторов, искажающих амплитудно-временную структуру сигналов, которые носят случайный характер. Основные трудности связаны с влиянием случайной морской поверхности на прохождение коллимированного лазерного пучка и наличием естественных случайных неоднородностей гидрофизических характеристик морской среды.

В основе методов решения обратных задач лазерного зондирования лежит уравнение переноса излучения в неоднородной поглощающей и рассеивающей среде [14–16, 21]. Это уравнение с учетом целого ряда допущений относительно характеристик зондирующего излучения, сред

распространения сигнала и границы раздела сред, специфики функционирования лидаров и их реальных аппаратурных характеристик, а также допущений, касающихся пространственно-временных распределений первичных гидрооптических характеристик конкретного типа морской среды, как правило, сводится в конечном итоге к уравнению лидара в малоугловом приближении однократного рассеяния [2, 14]. Приведенная ниже формула относится к случаю зондирования через гладкую границу раздела сред с высоты H :

$$U(L) = A P_0 \frac{c \tau_i}{2n} [\tau_a(1 - \rho)]^2 \frac{\sigma(\pi, L)}{(H + L/n)} \exp \left[-2 \int_0^L \varepsilon(L) dl \right], \quad (1)$$

где U – амплитуда сигнала; L – глубина; A – аппаратная постоянная лидара; P_0 – мощность импульса лазера; c – скорость света; τ_i – длительность зондирующего импульса; $\tau_a = \int_0^H \varepsilon_a(l) dl$ – коэффициент пропускания атмосферы, ε_a – показатель ослабления атмосферы; ρ – френелевский коэффициент отражения водной поверхности; $\varepsilon = \sigma + \chi$ – показатель ослабления морской среды, σ – показатель рассеяния (интегральное значение в полном телесном угле); χ – показатель поглощения; $\sigma(\pi, L)$ – показатель рассеяния в направлении «назад»; n – показатель преломления морской среды.

Приведенное уравнение для случая рассеяния Ми с учетом принятых допущений имеет модификации, связанные с различием энергетических сечений физических эффектов (СКР, флуоресценция и др.), лежащих в основе методов зондирования [2–5]. В данной работе рассмотрены методы и результатов лидарных исследований, как правило, опирается на уравнение моностатического лидара в малоугловом приближении однократного рассеяния. На сегодняшний день это соответствует реальной ситуации для подавляющего большинства используемых лидаров, хотя следует отметить проявившийся в последние годы интерес к лидарам глубинного зондирования с широким пучком [22].

Классификация методов лазерного зондирования, которые могут использоваться для определения различных характеристик верхнего слоя океана, приведена в таблице.

Таблица не претендует на исчерпывающую полноту: в ней, в частности, не отражены методы, использующие эффект Доплера, а также методы лазерного зондирования морской поверхности. В ряде случаев упомянуты методы, не вышедшие за рамки лабораторных экспериментов, но, по нашему мнению, являющиеся весьма перспективными (например, методы корреляционной и нелинейной спектроскопии [5, 23–25]).

Ниже рассматриваются физические эффекты, лежащие в основе лидарных методов, приведенных в таблице.

Лазерные методы исследования загрязнений водной среды

Тип взаимодействия излучения с веществом	Физические эффекты и основанные на них методы	Исследуемые характеристики и контролируемые параметры										
		Гидродинамические возмущения	Мутность	Фитопланктон	Хлорофилл	POB	НП	Бактериальная компонента	Тяжелые металлы	Температура, T	Соленость, S	
		Совокупность признаков пространственно-временной изменчивости	Относительные значения: $\sigma(L)^*$ – рассеяние $\varepsilon(L)$ – экстинкция	Состав (идентификация компонент). Концентрация						$T(L)$	$S(L)$	
Упругие	Методы инверсии уравнения лидара											
	Метод локальных экстремумов градиента											
	Двухканальный поляризационный метод											
	Методы линейной спектроскопии											
	Интерференция. Образование динамических биоспектров	Корреляционная спектроскопия										
Комбинированные методы упругих и неупругих взаимодействий	Рассеяние Ми и СКР											
	Флуоресценция и СКР	Метод нормирования по сигналу СКР										
Спонтанное комбинационное рассеяние	Изменение отношения спектральных компонент мономерной и полимерной фаз воды											
	Поляризационный											

Тип взаимодействий излучения с веществом	Физические эффекты и основанные на них методы		Исследуемые характеристики и контролируемые параметры									
			Гидродинамические возмущения	Мутность	Фитопланктон	Хлорофилл	РОВ	НП	Бактериальная компонента	Тяжелые металлы	Температура, T	Соленость, S
		Совокупность признаков пространственно-временной изменчивости	Относительные значения: $\sigma(L)^*$ – рассеяние $\varepsilon(L)$ – экстинкция	Состав (идентификация компонент). Концентрация						$T(L)$	$S(L)$	
Неупругие		Анализ огибающей спектра										
		Измерение интегрального параметра флуоресценции		Картирование поля ФО								
		Анализ спектра флуоресценции										
		Нелинейная флуориметрия										
		Многочастотная флуориметрия										
		Метод трехмерных матриц										
		Многоспектральная флуориметрия										
Методы нелинейной спектроскопии												
Когерентное комбинационное рассеяние		КАРС (когерентное антистоксово рассеяние света)										
		ОККР (оптический резонанс Керра)										
Вынужденное рассеяние Манделштама – Бриллюэна		Метод ВРМБ										
Плазменный пробой		Лазерно-искровой										

* L – глубина – экспериментально апробированные данные; – теоретические исследования и лабораторные эксперименты; РОВ – растворенное органическое вещество; НП – нефтепродукты.

2. Методы, основанные на упругом взаимодействии лазерного излучения с веществом

Применение таких методов основано на анализе огибающей импульса обратного рассеяния (ИОР) на несмещенной длине волны излучения лазера, соответствующей минимальному ослаблению в диапазоне «окна прозрачности» морской среды [14, 26]. Вклад рэлеевского рассеяния, как известно, даже в самых прозрачных водах не превышает ~ 10% [14]. Поэтому определяющим фактором в формировании огибающей ИОР является эффект рассеяния Ми на взвеси, размеры частиц которой соизмеримы с длиной волны зондирующего излучения.

С использованием уравнения (1) осуществляется анализ поля мутности как обобщенной характеристики загрязнений морской среды. Амплитудно-временная структура импульса обратного рассеяния содержит информацию о пространственном распределении и величинах концентрации взвеси (через величины σ , $\sigma(\pi)$), о наличии различных химических соединений и элементов, растворенных в морской воде (через величину χ), и

температурных неоднородностей, в том числе связанных с турбулентностью (через величину n).

Раздельные оценки величин χ или σ из уравнения (1) могут быть получены при определенных допущениях, касающихся конкретных типов морских вод, интервалов глубин и пространственно-геометрических характеристик приемно-передающего тракта лидара. Иначе говоря, та или иная физическая модель зондирования морской среды при соответствующих допущениях, касающихся первичных гидрооптических характеристик, приводит к приближению уравнения переноса излучения и определяет в конечном итоге требования к характеристикам лидара [2, 3, 15].

Например, при исследовании верхнего слоя океана для оптических длин трассы $\tau < 15 \div 20$ ($L < 100$ м), когда еще не наступает асимптотический режим, связанный с преобладанием процессов многократного рассеяния, на длине волны, соответствующей «окну прозрачности», для вод, где изменчивость χ по глубине существенно меньше изменчивости σ , амплитудно-временная структура ИОР практически определяется интегральной величиной σ и значением индикатрисы $\sigma(\pi)$ в малом телесном угле рассеяния «назад», который зависит от геометрических характеристик лидара [14]. В общем вели-

чина $\sigma(\pi)$ в силу ряда физических причин неоднозначно связана с интегральным значением σ (в полном телесном угле). В этом случае, как следует из уравнения (1), мелкоструктурная временная изменчивость в основном определяется значением рассеяния в обратном направлении.

Существующие лидарные методы диагностики поля мутности базируются преимущественно на оценке пространственно-временной изменчивости характеристик сигнала, не привязанных к абсолютным значениям первичных гидрооптических характеристик.

2.1. Метод инверсии уравнения лидара

Известна устойчивая форма инверсии уравнения лидара [27], т.е. решения обратной задачи – восстановления вертикального глубинного профиля $\varepsilon(L)$ по $U(L)$ – огибающей ИОР, применявшаяся к сигналам зондирования как атмосферы [27, 28], так и водной среды [7, 29]:

$$\varepsilon(r) = \frac{\exp\left[\frac{S(r) - S_m}{k}\right]}{\frac{1}{k} + \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \exp\left[\frac{S(r') - S_m}{k}\right] dr'}, \quad (2)$$

где $S(r) = \ln [P(r) r^2]$ – логарифм взвешенной по дальности мощности $P(r)$ сигнала обратного рассеяния; r – дальность; r' – текущее значение дальности; r_m – максимальное расстояние по трассе зондирования; $S_m = S(r_m)$.

Решение получено в предположении о существовании зависимости $\sigma = B \varepsilon^k$, где B и k – постоянные, причем величина k лежит в пределах 0,67–1,0 в зависимости от типа рассеивающих частиц. Однако это решение, устойчивое к флуктуациям сигнала, особенно заметным на конечном участке трасс зондирования, при малых уровнях принимаемой мощности, не учитывает эффектов многократного рассеяния.

Модифицированная форма решения с поправкой на изменение сечения пучка в неоднородной рассеивающей среде (в малоугловом приближении) согласно [30] получена в [31]:

$$\varepsilon(r) = \frac{\left[\frac{F(r)}{F(r_m)}\right]^{1/k} \exp\left[\frac{S(r) - S_m}{k}\right]}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \left[\frac{F(r')}{F(r_m)}\right]^{1/k} \exp\left[\frac{S(r') - S_m}{k}\right] dr'}, \quad (3)$$

где

$$F(r) = 1 + \left(\frac{\nu}{nH + r}\right)^2 \int_0^r \sigma(\xi) (r - \xi)^2 d\xi \quad (4)$$

$\nu = \gamma_0 n / \text{tg}\alpha$; $\gamma_0^2(\xi)$ – дисперсия угла отклонения при единичном акте рассеяния; α – угловая расходимость лазерного пучка; $\varepsilon_m = \varepsilon(r_m)$.

Результаты численного моделирования процесса восстановления профиля относительных значений $\varepsilon(r)$ с помощью решения (3) показали существенное снижение ошибок особенно для случаев стратификации с явно выраженным максимумом (до 2–3 раз в точке максимума). При моделировании использовались различные простые функциональные зависимости для $\varepsilon(r)$. Поскольку в реальной ситуации функция профиля $\varepsilon(r)$ при зондировании априор-

но неизвестна, то в процессе восстановления использовался функционал (4) для случая однородной среды ($\sigma(r) = \text{const}$). Как оказалось, это не приводит к заметным ошибкам, что обеспечивает возможность использования данного алгоритма для работы с реальными сигналами. Для калибровки шкалы ε в абсолютных значениях требуется проведение синхронных контактных измерений, что связано с технически непростой задачей взаимной калибровки дистанционных и контактных средств.

2.2. Метод локальных экстремумов градиента сигнала обратного рассеяния

Получение информации о структуре и характеристиках морской среды при анализе огибающей импульса обратного рассеяния Ми осложняется проблемой интерпретации данных. Это связано с тем, что огибающая ИОР неадекватна изменениям гидрооптических характеристик из-за эффектов многократного рассеяния, влияния случайного морского поверхностного на прохождение коллимированного лазерного пучка и обратнорассеянного излучения, а также резко нелинейного характера ослабления излучения с расстоянием. В этом случае имеет место значительная дисперсия амплитуд ИОР, которая усугубляется и рядом других факторов, сопутствующих работе авиационного лидара (вибрация и случайные возмущения положения авианосителя при полете в неоднородной турбулентной атмосфере, фоновые засветки, влияние приводного слоя атмосферы и др.).

На основе эвристического подхода к частному случаю решения обратной задачи лазерной гидрооптики разработан метод локальных экстремумов градиента (ЛЭГР), который весьма эффективен для решения задач мониторинга антропогенных воздействий на морскую среду [8, 12, 32, 33]. Метод использует характеристики относительной изменчивости сигнала – приближения к градиентам, нормированным на начальную амплитуду дискретизованного ИОР:

$$\nabla U(k) = \frac{U(k+1) - U(k)}{U(k-1)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где k – порядковый номер временного канала по шкале времени (глубин).

Временному каналу соответствует величина разрешения лидара по глубине

$$\Delta L = c \tau_w / 2n. \quad (6)$$

Процедура аналогична широко применяемому приему выделения скрытых особенностей в экспериментальных зависимостях, когда от самой функции переходят к ее производным (такой подход часто используется, например, в лазерной спектроскопии [16]). Результатом ее применения к дискретизованному ИОР является массив знакопеременных значений градиентов (включая нулевые).

Метод ЛЭГР заключается в логической процедуре отбора из полученного массива $\nabla U(k)$, $k = 1, \dots, K$ локальных экстремальных значений, которая повторяется для каждого из выборки M ($m = 1, \dots, M$) анализируемых импульсов. Физически это эквивалентно отбору в вертикальном разрезе морской среды точек с максимальными скоростями изменения гидрооптических характеристик. Вполне логичным кажется предположение, что точки локальных экс-

тремумов должны соответствовать границам прослоек в тонкой структуре рассеивающих слоев, в частности в области сезонного термоклина.

Двумерные массивы значений локальных экстремумов градиента $[\nabla U(k, m)]_{\max}$ и $[\nabla U(k, m)]_{\min}$, выделенные в анализируемой выборке M импульсов, могут усредняться как по числу μ_m появления экстремумов во всех K временных каналах m -го импульса (7), так и по числу μ_k появления экстремумов в k -м временном канале для всех M импульсов анализируемой выборки:

$$\langle \nabla U(m) \rangle_{\max, \min} = \frac{1}{\mu_m} \left[\sum_{k=1}^K \nabla U_m(k) \right]_{\max, \min}, \quad (7)$$

$$\langle \nabla U(k) \rangle_{\max, \min} = \frac{1}{\mu_k} \left[\sum_{m=1}^M \nabla U_k(m) \right]_{\max, \min}. \quad (8)$$

Массивы градиентов, различающихся по знаку, анализируются по отдельности. Физически различие знака свидетельствует о характере изменения свойств морской среды – увеличении или уменьшении мутности, что важно для решения задач мониторинга загрязнений.

В предложенном методе могут использоваться также и другие процедуры: двумерное сглаживание массива по k и m , построение гистограмм распределения интервалов глубин между точками ЛЭГР в единичном импульсе зондирования и др.

Эффективность предложенного метода подтверждена в натуральных экспериментах. Ниже приведены экспериментальные данные, полученные в ходе натуральных экспериментов с авиалидарами в северо-западной части Тихого океана у побережья Камчатки. Основные технические характеристики лидара: твердотельный лазер на кристалле АИГ Nd^{3+} в режиме удвоения частоты ($\lambda = 532$ нм); энергия в импульсе до 150 мДж; длительность импульса 10 нс; частота повторения 10 Гц; угловая расходимость лазерного пучка $(0,5-4) \cdot 10^{-3}$ рад; входная апертура приемного телескопа 280 мм; поле зрения $5 \cdot 10^{-3}$ рад. В качестве приемника использовался фотоэлектронный умножитель со схемой двухступенчатой временной регулировки усиления для сжатия динамического диапазона сигнала.

При обработке экспериментальных данных использовались соотношения (7) и (8), которые позволяют оценить изменчивость поля мутности вдоль направления зондирования как в среднем по слою (7) (рис. 1), так и в среднем по глубине (8) (рис. 2) для анализируемого участка трассы.

Как следует из рис. 2, а–в, положение максимума светорассеивающего слоя близко к глубине залегания термоклина по данным контактных измерений [8]. Полученные данные согласуются с градиентной моделью рассеивающего слоя [33]. Двумерное сглаживание распределений ЛЭГР в вертикальном разрезе морской среды позволяет выделить структуру светорассеивающего слоя.

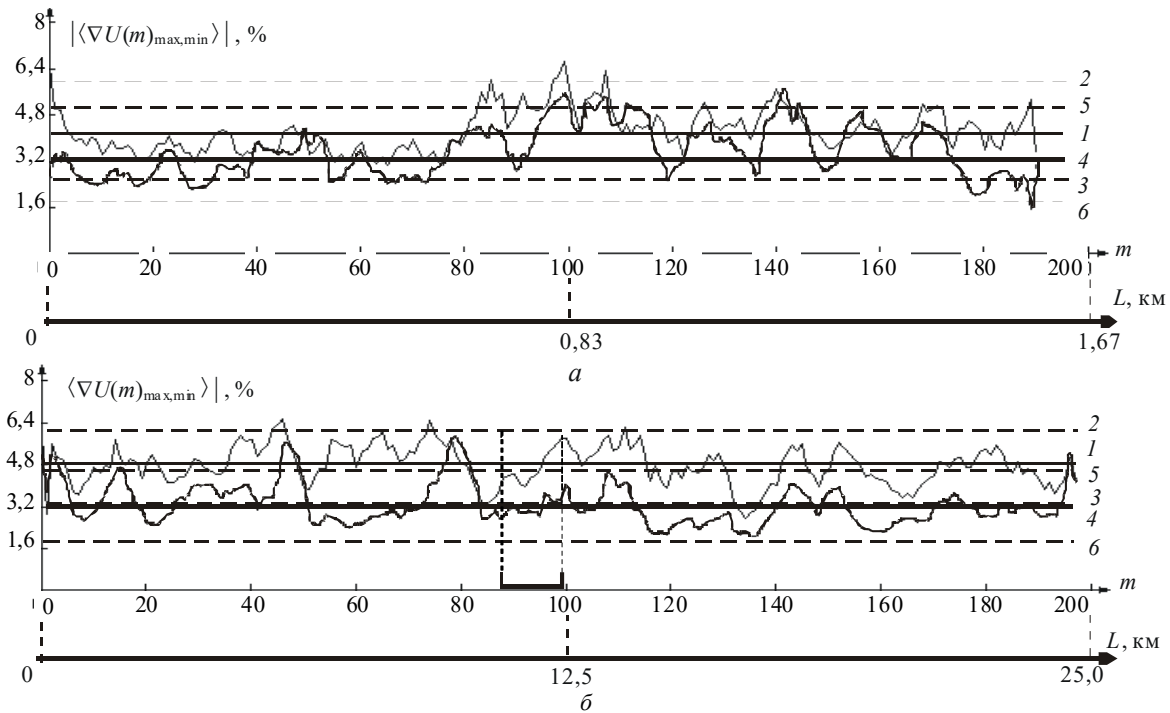


Рис. 1. Характеристики изменчивости поля мутности. Распределения средних по импульсу значений локальных экстремумов градиента: а – вдоль участка галса; б – вдоль полного галса; \dashv – указано положение участка галса (а) — $|\langle \nabla U(m)_{\min} \rangle| = E$; \dashv — $|\langle \nabla U(m)_{\max} \rangle| = E$ – уровни математического ожидания E для данных реализаций; 1, 4 – уровни E для max и min соответственно; 2, 5 – уровни $E + \sigma$ для max и min соответственно; 3, 6 – уровни $E - \sigma$ для max и min соответственно

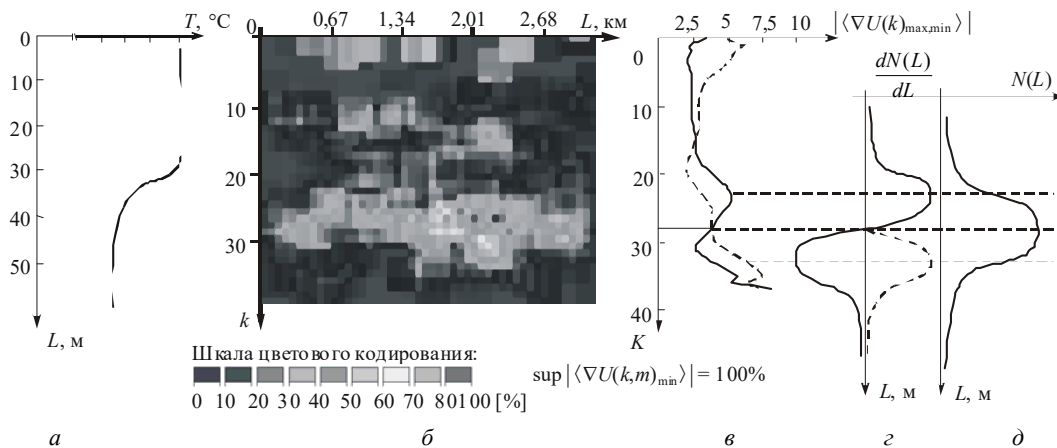


Рис. 2. Сопоставление данных контактных и лидарных измерений изменчивости поля мутности по глубине: *a* – контактные измерения профиля температуры (в относительных величинах); *б* – двумерное распределение локальных экстремумов градиента $|\langle \nabla U(k,m)_{\min} \rangle|$; *в* – распределения по глубине $|\langle \nabla U(k)_{\min} \rangle|$; $|\langle \nabla U(k)_{\max} \rangle|$; *г* – градиентная модель рассеивающего слоя $dN(L)/dL$; $-\cdot-\cdot-$ $|dN(L)/dL|$; *д* – идеализированная модель распределения концентрации рассеивателей $N(L)$

На рис. 3 представлена трехмерная проекция распределения отрицательных (аномальных) экстремумов градиента в вертикальном разрезе морской среды. При этом использовано цветокодирование величин сглаженных значений ЛЭГР в соответствии с цветовой шкалой, перекрывающей динамический диапазон значений.

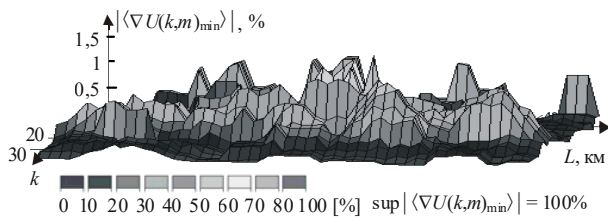


Рис. 3. Трехмерная проекция распределения отрицательных («аномальных») локальных экстремумов градиента в вертикальном разрезе морской среды

Известны также и другие результаты по выделению светорассеивающих слоев лидарными методами [34–37]. Так, в работах [35, 36] описаны эксперименты по синхронному акустическому и лидарному зондированию верхнего слоя океана. При этом использовались два варианта зондирования: через морскую поверхность и через погружной иллюминатор. При восстановлении профиля $\epsilon(L)$ использовался простейший алгоритм инверсии в приближении однократного рассеяния

$$\epsilon(L) = c^{-1} (L_2 - L_1)^{-1} [\lg P(L_1) - \lg P(L_2)]. \quad (9)$$

Распределение ϵ в вертикальном разрезе морской среды представлено на рис. 4. Диапазон глубин составляет 21–33 м и соответствует положению термоклина. Разрешение по глубине 1 м. Наряду со слоями в вертикальном разрезе поля ϵ обнаруживаются «ячейки» («линзы») с повышенными значениями мутности и прозрачности [36]. Аналогичные результаты получены и методом ЛЭГР (см. рис. 3), но уже в другом пространственном масштабе.

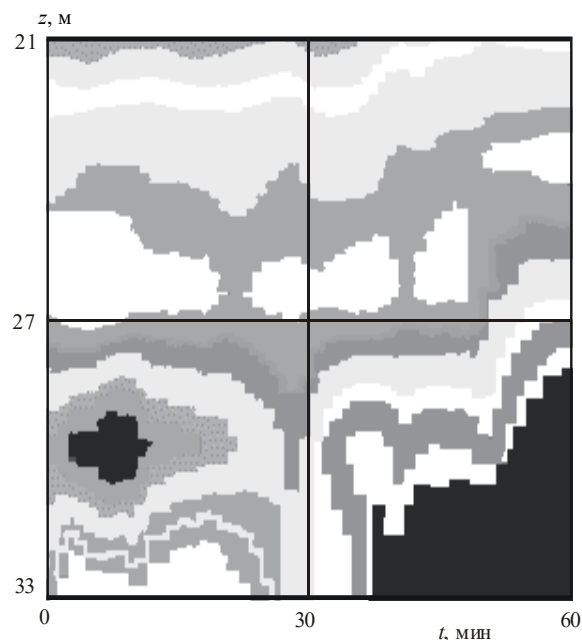


Рис. 4. Пространственно-временное поле светорассеивающих слоев: \square – ячейки с повышенным, \blacksquare – с пониженным значениями коэффициента ослабления

В работе [37] выделение светорассеивающих слоев производилось путем вычитания усредненного эталонного ИОР, соответствующего чистым, незамутненным водам, из ИОР, полученных в более мутных водах шельфовой зоны.

2.3. Метод исследования поля мутности, использующий эффект поляризации излучения

Неоднородности в вертикальном распределении взвеси влияют на поляризацию обратнорассеянного излучения. В работах [2, 34, 38–41] рассматривается способ определения вертикального профиля мутности по временной измен-

чивости соотношения ортогональных компонент поляризации ИОР (F_{\parallel} , F_{\perp}) при исходной линейной поляризации зондирующего сигнала:

$$p(t) = \frac{F''(t) - F^{\perp}(t)}{F''(t) + F^{\perp}(t)}, \quad (10)$$

где $p(t)$ – степень поляризации.

Для случая малоуглового приближения и в предположении, что распределение по глубине показателя рассеяния пропорционально производной по времени от степени поляризации ИОР:

$$\sigma(t) = - \frac{1}{c \Delta\alpha} \frac{d}{dt} [\ln p(t)], \quad (11)$$

где $\Delta\alpha$ – нормирующий параметр, получены результаты определения профиля σ [L] ($L = ct/2n$), рассчитанные на основе измерений поляризованных компонент рассеянного сигнала и дополненные данными контактными измерениями профиля ϵ [L]. Следует заметить, что реально измерение поляризованных компонент возможно в ограниченном интервале глубин из-за быстрого спада, вызванного деполаризацией сигнала при многократном рассеянии.

3. Методы, основанные на неупругих взаимодействиях лазерного излучения с веществом

Рассматриваемая группа методов основывается на анализе спектров КР флуоресценции, ВРМБ и др., возбуждаемых импульсами лазерного излучения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра [1, 5, 18, 20]. Перечисленные физические процессы наблюдаются при неупругих взаимодействиях излучения с веществом, когда энергия переизлучаемого кванта отличается от энергии исходного излучения [1, 18, 19].

Комбинационное рассеяние, или Раман-эффект, имеет место для всех химических элементов и соединений, присутствующих в облучаемом объеме морской воды [1, 18, 19]. Основными преимуществами метода, использующего этот эффект, являются:

фиксированное смещение парциальных спектральных компонент для примесей относительно зондирующего сигнала;

пропорциональность интенсивности парциальных компонент спектра концентрации примесей;

ограниченная длительность процесса КР, что позволяет улучшить отношение сигнал/фон за счет временного стробирования;

возможность получения панорамных спектров при использовании одного лазера.

Весьма ценным свойством является зависимость сигнала СКР от концентрации молекул воды (которая величина постоянная), что позволяет использовать огибающую сигнала СКР как опорную, «реперную» для нормировки сигналов (рассеяния Ми, флуоресценции) либо (при спектральных измерениях) линию СКР воды для нормировки других компонент спектра [5, 20]. При этом существенно снижается влияние дестабилизирующих факторов, главным из которых является случайная морская поверхность, через которую проходят прямой и обратный сигналы.

Однако сечение процесса КР более чем на три порядка ниже сечения рэлеевского рассеяния, что ограничивает возможности метода при дистанционном зондировании верхнего слоя океана.

Флуоресценция наблюдается, когда лазерное излучение на частоте определенного электронного перехода в атоме или молекуле испытывает поглощение с переизлучением на более низкой частоте [19]. В молекулах из-за наличия группы уровней перехода излучение широкополосное и отношение сигнал-шум невелико, поэтому при использовании эффектов флуоресценции используются также временные характеристики процесса [1, 19].

Интенсивность сигналов флуоресценции наиболее распространены в морской среде органических соединений при типичных значениях их концентраций сравнима с сигналом КР, что позволяет для описания флуоресцентных свойств морской воды ввести подобно первичным гидрооптическим характеристикам параметр флуоресценции

$$\Phi_0 = I_{\text{фл}}/I_{\text{кр}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{фл}}$ и $I_{\text{кр}}$ – интегральные значения чисел квантов в полосе измерений.

Этот параметр широко используется при исследованиях трех основных классов органических примесей, присутствующих в морской воде: фитопланктона, растворенного органического вещества и нефтепродуктов [20, 42, 43]. Путем определения Φ_0 в процессе лазерного зондирования решается задача картирования флуоресцентных полей и оценки их пространственно-временной изменчивости. Сопоставление данных для разных участков обследуемых акваторий позволяет определить зоны загрязнений с учетом априорной информации о гидрологических, гидробиологических и гидрохимических характеристиках данного района.

Атомная, или резонансная, флуоресценция наблюдается на частоте определенного перехода в атоме, совпадающей с частотой зондирующего излучения. Сечение процесса – одного порядка с рэлеевским, однако столкновения квантов с молекулами преобладающих по концентрации веществ приводят к быстрому затуханию процесса [19].

Вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна наблюдается при рассеянии лазерного излучения конденсированными средами в результате его взаимодействия с собственными упругими колебаниями этих сред (звуковыми или гиперзвуковыми волнами) и сопровождается изменением набора частот, характеризующих излучение [18].

4. Лидарная диагностика загрязнений морской среды органическими соединениями (растворенными органическими веществами, нефтепродуктами, фитопланктоном)

Органические соединения, загрязняющие морскую среду, можно разделить на три основные группы: растворенные органические вещества, нефтепродукты, некоторые виды хлорофилла и фитопланктона, повышенная концентрация которых является следствием аномально интенсивного развития при наличии первичных загрязняющих РОВ [49]. Для их диагностики обычно используются методы флуориметрии.

4.1. Особенности диагностики растворенных органических веществ

Сложность проблемы диагностики РОВ объясняется рядом факторов. Во-первых, чрезвычайно многообразием соединений, присутствующих в морской воде, большая часть которых еще не идентифицирована. Во-вторых, разнообразием форм спектров флуоресценции, определяемых сложной структурой молекул органических соединений. В-третьих, тем обстоятельством, что спектры РОВ часто наложены один на другой и на спектры НП, что затрудняет их выделение и идентификацию.

Заметим также, что целый ряд РОВ вообще не имеет полос поглощения в видимой области спектра и поэтому не может быть обнаружен прямыми лазерными методами. Изучению характеристик флуоресценции РОВ уделяется большое внимание [17, 44–48].

Для идентификации соединений могут использоваться следующие характеристики:

- длина волны максимума флуоресценции при фиксированной длине волны возбуждения [19];
- форма полосы флуоресценции, которая количественно может быть отражена в виде соотношения интенсивностей на двух длинах волн [44];
- время жизни флуоресценции, которое не зависит от длины волны регистрации и лежит в широком диапазоне (0,1–100 нс) для разных видов соединений [45];
- эффект насыщения флуоресценции, связанный с изменениями спектра под воздействием мощного лазерного излучения [46, 48].

4.2. Возможности диагностики загрязнений водной среды нефтепродуктами

Нефтепродукты в морской воде подвержены воздействию целого ряда физико-химических процессов, результатом которых является образование в подповерхностном слое растворенных, эмульгированных и диспергированных фракций [11, 49, 50]. Сигнал флуоресценции водной среды в этом случае отличается более высокой интенсивностью по сравнению с морской водой, с «фоновым» содержанием хлорофилла и РОВ. При этом наблюдается подавление линии КР воды [43, 46, 48, 51].

Разработка количественных методов определения НП затруднена ввиду многообразия их типов и наличия процессов трансформации в морской среде. В работе [43] предложен метод, основанный на раздельном определении растворенной и эмульгированной фракций. Свойства, присущие каждой фракции, оказались близкими для всех исследованных сортов НП, что позволило получить алгоритм определения коэффициента связи α между концентрацией и параметром флуоресценции ($c = \alpha \Phi$). На этой основе предложена методика дистанционного количественного определения (без идентификации НП) растворенных и эмульгированных фракций на разных стадиях старения НП.

4.3. Особенности диагностики фитопланктона

Фитопланктон, как всякая биологическая система, весьма чувствителен к изменениям внешних условий, в частности к антропогенным загрязнениям, действие которых проявляется [52–54]:

– в изменении структуры, выражающемся в нарушении численности популяций, образующих фитопланктон, вплоть до полного исчезновения отдельных видов;

– функциональных нарушениях у всех форм фитопланктона при синтезе нового органического вещества и его распаде в ходе внутриклеточной деструкции;

– токсическом эффекте, наиболее сильно проявляющемся в период активного роста водорослей при оптимальной температуре, освещенности и обеспеченности биогенными элементами.

Информация о составе и свойствах фитопланктона содержится в спектральных и временных характеристиках сигналов флуоресценции. Особенностью фитопланктона является зависимость сигналов наведенной флуоресценции (как временная, так и по интенсивности, а в ряде случаев и по спектру) от уровня возбуждающего излучения. Характеристики флуоресценции определяются пигментами фитопланктона, которые условно делятся на следующие основные группы [52, 53, 55, 59]: хлорофиллы (типы «А», «В», «С»); фикобилины; каротиноиды и ксантофилы.

По результатам исследований установлено, что в морском фитопланктоне хлорофилл «А» присутствует во всех типах водорослей. Наличие фикобилинов характерно для всех типов сине-зеленых водорослей, что может служить косвенным признаком загрязнений.

Океанский и, в большинстве случаев, морской хлорофилл имеет довольно узкую полосу флуоресценции за счет хлорофилла «А». При возбуждении в спектральной области 480–630 нм «реперная» компонента КР воды расположена оптимальным образом относительно полосы флуоресценции фитопланктона. При измерении параметра Φ_0 возможна привязка его значений к концентрации хлорофилла «А», значениям биомассы или числу клеток. Существуют стандартные методики определения этих параметров.

Видовая идентификация компонент фитопланктона возможна с помощью многочастотной лазерной флуориметрии за счет видовых различий в спектрах [56]. Зная зависимости $\Phi_0(\lambda_{\text{возб}})$ для разных компонент, можно идентифицировать их и определить парциальные вклады в общую полосу флуоресценции [59]. В последнее время предложен целый ряд методов диагностики РОВ и НП, улучшающих характеристики традиционных методов флуориметрии.

4.4. Основные методы лазерной диагностики РОВ, НП и фитопланктона

Интенсивно развивающееся направление диагностики органических загрязнений водной среды методами дистанционной лазерной спектроскопии направлено в основном на решение задачи идентификации видов загрязняющих компонент и оценки их концентраций независимо от того, какой группе соединений (РОВ, НП или фитопланктон) они принадлежат. Приведенные выше краткие сведения, характеризующие состояние проблемы диагностики РОВ, НП и фитопланктона, свидетельствуют о ее сложности ввиду чрезвычайного многообразия компонент с перекрывающимися спектрами и разнообразной кинетикой спектров, находящихся под влиянием множества факторов (географических, климатических, метеорологических, гидрофизических, гидрхимических, временных и др.). Все это позволяет реализовать ряд методов лазерной диагностики, основывающихся на использовании частных информативных

признаков спектра за счет достаточно тонких физических эффектов.

Эти методы апробированы в натуральных и лабораторных экспериментах [20, 42, 43, 46–48, 51, 54–59].

Метод нелинейной флуориметрии основан на различии для РОВ и НП коэффициента нелинейности [47]:

$$\beta = \lim_{F \rightarrow 0} \frac{\partial \Gamma(F)}{\partial F}, \quad (13)$$

где $\Gamma(F) = \Phi_0 / \Phi(F)$; F – плотность потока фотонов.

Однако этот метод применим для случая присутствия в воде только одной примеси.

Метод многочастотной флуориметрии [47] для различения парциальных вкладов РОВ и НП основан на различии флуоресцентного параметра Φ_0 от длины волны возбуждающего излучения. Измерив результирующий параметр $\Phi_0^\Sigma = \Phi_0^{\text{РОВ}} + \Phi_0^{\text{НП}}$ на длинах волн λ_1 и λ_2 , можно определить по отдельности величины слагаемых.

Метод TLS-диаграмм (Total Luminescence Spectra) [57] основан на регистрации спектров флуоресценции при возбуждении на различных длинах волн и построении диаграмм равной интенсивности излучения для случаев анализа многокомпонентных примесей.

Метод трехмерных матриц [58], т.е. набора «мгновенных» спектров, использующий как спектральную, так и временную информацию о примесных компонентах, относится к методам кинетической спектроскопии с высоким временным разрешением (порядка 0,1 нс).

Методы многочастотной флуориметрии и TLS-диаграмм могут считаться универсальными по отношению к основным группам органических загрязнений.

Многоспектральный метод [59] предполагает использование перестраиваемого лазерного излучателя и может оказаться эффективным, благодаря выраженной спектральной селективности показателя поглощения пигментов хлорофилла и его отличия от спектральных зависимостей показателей поглощения и рассеяния РОВ. Метод основан на формировании синтезированного сигнала с помощью разностного алгоритма $I_{\text{разн}} = B_{i1} - B_{i2}$, где B_{i1} и B_{i2} – регистрируемые сигналы в соответствующих спектральных каналах.

Применение разностного алгоритма позволяет уменьшить влияние аддитивных световых помех, возникающих при отражении или рассеянии падающего излучения слоем атмосферы, морской поверхностью и слоем воды над регистрируемой глубинной аномалией хлорофиллсодержащих взвесей стимулированных биолюминесцентных.

4.5. Экспериментальные результаты

Несмотря на разнообразие перечисленных методов диагностики органических соединений, практика дистанционного лазерного зондирования, учитывающая реалии существующих на сегодняшний день технических средств, как правило, ограничивается измерениями параметра флуоресценции и концентрации некоторых видов хлорофилла. Ниже приводятся некоторые данные исследований, проведенных на Черном и Балтийском морях.

В работе [55] приведены результаты экспериментов по исследованию РОВ в прибрежной части черноморского побережья России. Вклад в полосу флуоресценции давали как РОВ, так и НП, поэтому при анализе результатов можно говорить лишь об оценке интегрального флуоресцентного параметра на длине волны 335 нм. Результаты картирования указанного параметра представлены на рис. 5.

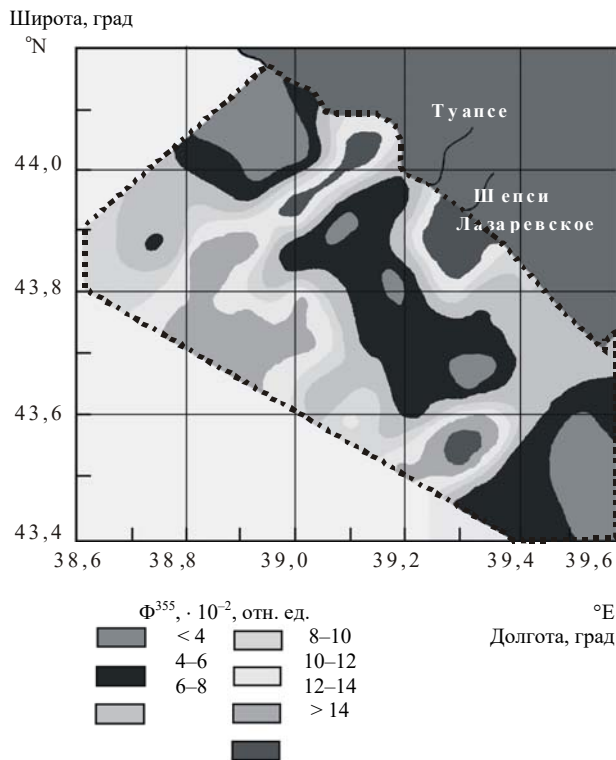


Рис. 5. Схема горизонтального распределения флуоресцентного параметра Φ^{355} на обследованной территории Черного моря

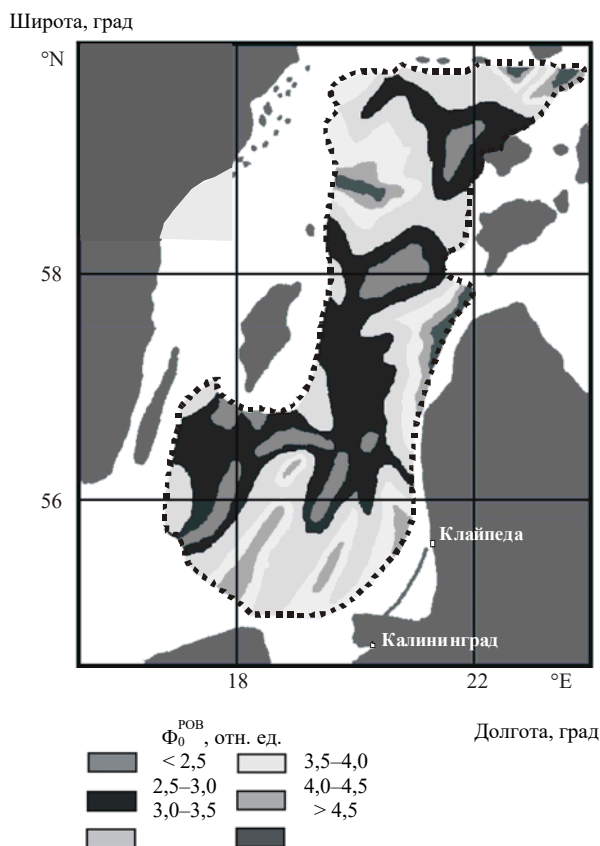


Рис. 6. Распределение интенсивности флуоресценции РОВ в приповерхностном слое Балтийского моря в мае–июне 1984 г.

Анализ показывает, что на большей части обследованной акватории его значения не превышали 0,1. Это свидетельствует о невысоком уровне содержания органического вещества в прибрежных районах. Исключением является локальное пятно в мористой части акватории, где значение параметра составляет 0,3.

Содержание органического вещества увеличивалось в прибрежной полосе городов (Туапсе, Лазаревское). В районе устья реки Шепсы выявилось повышенное содержание органического вещества, связанное с влиянием речного стока.

Распределение параметра Φ_0 , построенное для обширного района акватории Балтийского моря по результатам мониторинга [42], представлено на рис. 6. На рисунке прослеживается влияние выбросов вод с повышенным содержанием органического вещества в районах с интенсивной промышленной деятельностью.

5. Методы измерения температуры и солености морской воды с помощью лидаров

Измерения температуры с помощью дистанционного лазерного зондирования основываются на эффектах КР. Физическая основа метода состоит в следующем [60]:

жидкая вода существует по меньшей мере в двух основных формах – мономерной и полимерной (полимерная форма характеризуется дополнительными связями гидроксильных групп между молекулами), обе формы находятся в состоянии равновесия как функции температуры;

уширение рамановской спектральной линии гидроксильной группы (O–H) существенно различается для мономерной и полимерной форм;

интенсивности парциальных компонент спектра, соответствующие мономерной λ_1 и полимерной λ_2 формам, пропорциональны их концентрации, что позволяет определить равновесную температуру по соотношению интенсивностей компонент.

Поскольку сечение процесса КР почти на три порядка меньше сечения процесса рассеяния Ми, то диапазон глубин при измерениях температур ограничен [6]. На точность измерений влияют такие факторы, как поверхностное волнение, помехи естественного светового фона, наведенной лазерной флуоресценции и различия в условиях распространения излучения для двух компонент спектра.

Известные результаты получены при судовых измерениях [60] и измерениях, проводившихся с береговой платформы [61]. Максимальная глубина измерений ≤ 30 м. Ошибка измерений температуры не превышала ± 1 °С.

Поляризационный метод измерения температуры характеризуется тем, что используется поляризованное зондирующее излучение и регистрируются два рамановских спектра сигналов с ортогональной поляризацией. Отношение компонент спектров является функцией длины волны и, в свою очередь, зависит от температуры. Оценочные расчеты [60] показывают, что ожидаемая ошибка составляет 0,5 °С для оптической длины трассы $\tau = \varepsilon L \leq 4$ при 1 Дж излучаемой энергии.

Метод когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) относится к методам нелинейной лазерной спектроскопии [23, 24]. Эти методы обладают преимуществами в части спектрального и пространственного разрешения, отношения сигнал-шум и т.д., но пока не вышли за рамки лабораторных экспериментов, поскольку необходимым ус-

ловием их применения является требование синхронизма взаимодействующих волн, а при дистанционном зондировании источник накачки и приемник сигнала разделены границей исследуемой среды. В работах [23, 24] предложена и реализована в лабораторных условиях модификация метода поляризационного КАРС, принципиально пригодная для дистанционных измерений. Согласно этому методу волна накачки возбуждается в среде за счет процесса вынужденного рассеяния света «назад» (в частности, ВРМБ). Анализ лабораторных экспериментов показывает, что ожидаемая ошибка измерений температуры не превышает ± 1 °С при дисперсии сигнала 10%. Подавление флуктуаций до 1% наряду с анализом температурных изменений других параметров спектра (формы, ширины линий и пр.) должно более чем на порядок повысить точность измерений.

Метод огибающей спектра комбинационного рассеяния. Огибающая спектра КР морской воды зависит не только от температуры T , но и от содержания растворенных солей S . Оценка этих параметров при измерениях интенсивности компонент в нескольких спектральных каналах согласно методу [62] осуществляется в предположении, что интенсивность спектра КР представляет собой сумму линейных функций

$$\xi_i = \alpha_{iT}T + \alpha_{iS}S + \beta_i + v_i, \quad (14)$$

где i – номер спектрального канала; α_{iT} и α_{iS} – коэффициенты, определяющие влияние T и S на интенсивность КР в i -м канале; β_i – постоянная составляющая, равная средней интенсивности КР в i -м канале при нулевых значениях T и S ; v_i – случайная погрешность измерений в i -м канале (с нулевым средним $E v_i = 0$ и известной дисперсией $E v_i^2 = \sigma_i^2$).

При имеющейся совокупности измерений $\{\xi_i\}$ в i спектральных каналах задача определения T и S как случайных величин с заданными статистическими погрешностями ставится с точки зрения минимизации погрешностей измерения в среднем. Для решения этой задачи необходимо знание величин α_{iT} и α_{iS} , которые предварительно определяются в измерениях m тестовых спектров КР при известных T и S . Набор тестовых спектров получается при строго дозированных изменениях солености тестовых растворов и контролируемой температуре.

Для решения задачи определения T и S предложен алгоритм, основанный на применении математического аппарата теории оценивания [62]. Более простой способ получения оценок T и S реализуется с помощью метода наименьших квадратов.

По данным лабораторных исследований ошибки измерения лежат в пределах: $\Delta T = \pm 0,7$ °С; $\Delta S = \pm 1,05$ ‰.

6. Метод определения содержания тяжелых металлов в морской среде (лазерно-искровой метод)

Суть лазерно-искрового метода состоит в инициировании плазменного образования на морской поверхности под действием сфокусированного лазерного пучка с высокой плотностью энергии импульсного излучения и последующем анализе спектра свечения плазмы с целью определения характеристических линий атомной флуоресценции различных элементов [63–66]. Наличие свободных высокотемпературных электронов в плазме приводит к возбуждению атомов и молекул за счет неупругих столкновений в

парах, вызывая их интенсивное свечение. Энергия линий эмиссионного спектра при оптическом пробое на несколько порядков выше, чем тепловое свечение высокотемпературных паров при интенсивностях лазерного излучения ниже порога оптического пробоя.

Если при анализе спектров комбинационного рассеяния только 10^{-9} -я часть светового потока участвует в процессе формирования сигнала обратного рассеяния, то в искровом анализаторе в плазме, образованной пробоем лазерного излучения в атмосфере, реально поглощается до 90% энергии лазерного импульса. Однако обнаружение малых концентраций примесных элементов в эмиссионном спектре происходит в присутствии излучения базовых компонентов атмосферы – азота и кислорода, концентрации которых, а следовательно и интенсивность спектральных линий, на несколько порядков выше концентраций примесей.

Однако эта трудность преодолевается за счет временной селекции эмиссионных спектров. Динамика лазерного пробоя такова, что собственно пробой и разогрев плазмы происходят за время лазерного импульса (10–100 нс в предлагаемом варианте лидара). При этом мгновенная температура электронов может достигать до десятков тысяч градусов. По окончании лазерного импульса идет процесс расширения (разлет) и охлаждения плазмы. В ходе процесса из возбужденного состояния первыми выпадают элементы с более высокими потенциалами ионизации. С другой стороны, скорость охлаждения плазмы экспоненциально снижается во времени. Таким образом, за счет временного стробирования системы регистрации удается на много порядков ослабить линии спектра базовых компонентов атмосферы. Таково качественное изложение процесса, поскольку его физико-математическая модель, определяемая многими факторами, чрезвычайно сложна и пока не доведена до уровня точных количественных соотношений для описаний параметров спектров определяемых примесей.

В натуральных условиях метод лазерного искрового эмиссионного анализа может быть реализован при наличии в составе лидара многоканального спектрометра и узла фокусировки пучка. Лазерно-эмиссионный анализ не предъявляет каких-либо особых требований к длине волны излучателя.

В предложенном варианте вертолетного лидарного комплекса [6, 65] используется твердотельный лазер на кристалле АИГ Nd³⁺, работающий в режиме удвоения частоты. Базовые параметры лидарного комплекса те же, что и для случая глубинного зондирования.

Анализ водной среды с целью обнаружения тяжелых металлов (Cu, Pb, Hg, Cd, Co и др.) и их соединений, а также других экологически опасных примесей может осуществляться с высот 10–15 м.

Минимальные измеряемые значения концентраций анализируемых примесей составляют (10^{-2} – 10^{-3})%. В лабораторных условиях достигаются значения до 10^{-7} %. Спектральная разрешающая способность системы 1,1 нм/канал. Чувствительность в области 200–800 нм составляет около 1000 фот./отсчет.

Для интерпретации линий спектра создана база данных атомно-флуоресцентного анализа, содержащая 80 тыс. линий 60 наиболее распространенных в природе элементов [65].

Заключение

Проведенный анализ лидарных методов свидетельствует об их эффективности для дистанционной диагностики загрязнений морской среды. Эти методы позволяют исследовать такие характеристики, как мутность, соленость,

температура, а также обнаруживать содержание в воде РОВ, растворенных, эмульгированных и дисперсных фракций НП, растворенного кислорода, азота, фосфора, тяжелых металлов и т.п. Исследования поля мутности и статистических характеристик поверхностного волнения дают возможность получения некоторой информации о гидродинамических процессах, происходящих в толще морской среды, которая может быть использована для обнаружения загрязнений, вызываемых антропогенными воздействиями, и для картирования района загрязнений.

С помощью лазерных методов дистанционного зондирования возможно определять концентрацию основных компонент фитопланктона и других биогенных компонент, которая дает информацию об экологическом состоянии акватории. Это позволяет при использовании разработанных специальных математических моделей экосистем морского шельфа оценивать риск для живых компонент экосистем и определять допустимую антропогенную нагрузку при воздействии на шельфовую акваторию [8, 12, 67].

Наиболее проработанными в настоящее время являются следующие лидарные методы: метод оценки изменчивости поля мутности, основанный на анализе огибающей импульса обратного рассеяния, метод лазерной флуориметрии с нормировкой по сигналу КР, позволяющей определять концентрацию РОВ, НП и фитопланктона, и метод измерения температуры, основанный на КР.

В современных условиях, когда крайне ограничены средства на проведение экспериментов с авиалидерами, особую значимость приобретает направление совершенствования методов обработки и анализа накопленных ранее данных. Работы по этому направлению могут послужить основой для создания новых методов лидарной диагностики, область приложений которой в исследованиях Мирового океана может быть значительно шире рассмотренных в данной статье.

1. *Межерис Р.* Дистанционное лазерное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. *Лазерное зондирование атмосферы и подстилающей поверхности* / Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1991. 147 с.
3. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 286 с.
4. *Дистанционный контроль верхнего слоя океана* / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
5. *Бункин А.Ф., Власов Д.В., Миркамлиев Д.М.* Физические основы лазерного зондирования поверхности Земли. Ташкент: Фан, 1987. 272 с.
6. *Бункин Ф.В., Бункин А.Ф.* Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 63–69.
7. *Lutomirski R.F.* Lidar remote sensing of ocean waters // SPIE. V. 2222. P. 12–19.
8. *Бондур В.Г.* Методы дистанционного мониторинга антропогенных воздействий на морские акватории // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. Научные основы создания и применения аэрокосмических систем наблюдения Земли / Под ред. В.Г. Бондура, А.И. Савина. М.: Наука, 2000. 496 с.
9. *Бондур В.Г.* Мониторинг поверхности морей и океанов. Мониторинг загрязнений поверхности акваторий // Материалы доклада на заседании подгруппы по стихийным бедствиям Рабочей группы по окружающей среде Российско-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству «В.С. Черномырдин – А. Гор». М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 1996. 26 с.
10. *Bondur V.G.* Techniques and systems of monitoring of anthropogenic impact on coastal ecosystems Gore – Chernomyrdin Environmental Working Group Initiative Proceeding of the Global

- Environmental Disaster Monitoring Subgroup Meeting. Rosslyn, Virginia, USA, 16–17 September, 1996. 24 p.
11. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
 12. Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
 13. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 1–2. С. 14–27.
 14. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана; Т. 2. Прикладная оптика океана. М.: Наука, 1983. 371 с., 236 с.
 15. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики. Минск: Высшая школа, 1976. 504 с.
 16. Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules / Ed. H. Walter. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer-Verlag, 1976.
 17. Лаквич Ф. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986. 496 с.
 18. Фабелинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. М., 1965.
 19. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
 20. Клышко Д.Н., Фадеев В.В. Дистанционное определение концентрации примесей в воде методом лазерной спектроскопии с калибровкой по комбинационному рассеянию // ДАН СССР. 1978. Т. 238. № 2. С. 320.
 21. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 229 с.
 22. Keeler R.N., Ulich B.L. Some aspects of wide beam imaging lidar performance // SPIE. V. 2258. Ocean Optics XII. P. 480–501.
 23. Бункин А.Ф., Власов Д.В., Гараев Р.А. О возможности применения метода когерентного антистоксова рассеяния света при ВРМБ назад // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. С. 669–671.
 24. Бункин А.Ф., Власов Д.В., Гараев Р.А. Экспрессная дистанционная регистрация спектра КАРС // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. С. 1902–1903.
 25. Bin Zheng, Pleass C.M., Ih C.C. Feature information extraction from dynamic biospekle // Appl. Optics. 1994. V. 33. № 2. P. 231–237.
 26. Иванов А. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.
 27. Klett J.D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Optics. 1981. V. 20. № 27. P. 211–220.
 28. Kaestner M. Inversion von simulierten satellitensignalen // Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Munchen. 1987. № 56. P. 148–156.
 29. Billard B., Abbot R.H., Penny M.F. Airborne estimation of sea turbidity parameters for the WRELADS laser airborne depth sounder // Appl. Optics. 1986. V. 25. № 13. P. 2080–2088.
 30. Долин Л.С., Савельев В.А. О структуре узкого пучка света в стратифицированной рассеивающей среде // Оптика моря. М.: Наука, 1983. С. 123–128.
 31. Власов Д.В., Зубков Е.В., Шамаев С.И. Инверсия уравнения лидара с учетом малоуглового рассеяния // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 324–331.
 32. Бункин Ф.В., Власов Д.В., Зубков Е.В. и др. // Тезисы докладов межведомственного научно-технического совещания «Статистические методы и системы обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды». Минск: Институт прикладных физических проблем им. Севченко, 1989. С. 149–151.
 33. Zubkov E.V., Bunkin A.F. Recording vertical structure of optical characteristics of the upper ocean by a method of local gradient extrema of a lidar return // Bulletin of Russian Academy of Sciences (BRAS)/ Supplements Physics of Vibrations. 1995. V. 59. № 3. P. 165–172.
 34. Пеннер И.Э., Шамаев В.С. Опыт одновременного зондирования моря судовым и самолетным лидарами // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 1. С. 107–111.
 35. Букин О.А., Ильичев В.И., Критский И.А., Павлов А.Н. Некоторые результаты лидарного зондирования верхнего слоя океана. Препринт / Тихоокеанский океанологический институт ДВО АН СССР. (Владивосток). 1989. 6 с.
 36. Букин О.А., Киселев В.Д., Кленин С.А. и др. Комплексное оптоакустическое зондирование верхнего слоя океана. Препринт / Тихоокеанский океанологический институт ДВО АН СССР. (Владивосток). 1988. 18 с.
 37. Hoge F.E., Wright C.W. et al. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // Appl. Optics. 1988. V. 27. № 19. P. 3969–3977.
 38. Васильков А.П., Кондранин Т.В., Мясников Е.В. Определение профиля показателя рассеяния света по поляризационным характеристикам отраженного назад излучения при импульсном зондировании океана // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. № 3. С. 307–312.
 39. Vasilkov A.P., Kondranin T.V., Myasnikov E.V. Polarization of backscattering radiation at remote sensing of the ocean with impulse laser beam // Proc. of PORSEC. Okinawa, 1992. V. 2. P. 1058–1062.
 40. Vasilkov A.P., Goldin Y.A., Gureyev B.A. Airborne lidar remote sensing of vertical distribution of sea water scattering coefficient // Appl. Laser Radar Technology. SPIE. 1993. V. 1936. P. 233–244.
 41. Абрамочкин А.И., Занин И.И., Пеннер И.Э. Самолетные поляризационные лидары для исследования атмосферы и гидросферы // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 92–96.
 42. Демидов А.А., Чекалок А.М., Лашиенкова Т.В., Фадеев В.В. Дистанционный лазерный мониторинг органических примесей в воде с борта судна // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 62–70.
 43. Аброскин А.Г., Нольде С.Е., Фадеев В.В., Чубаров В.В. Определение концентрации эмульгированно-растворенных в воде нефтей методом лазерной флуориметрии // ДАН СССР, 1987.
 44. Fantasia J.F., Ingrao H.C. The development of an experimental airborne laser oil spill remote sensing system // Proc. of Joint Conf. on prevention control of oil spills. Washington, USA. March 13–15, 1973. P. 101–115.
 45. Rayner D.M., Szabo A.G. Time-resolved laser fluorescensors: a laboratory study of their potential in the remote characterization of oil // Appl. Optics. 1978. V. 17. № 10. P. 16–24.
 46. Фадеев В.В., Чекалок А.М., Чубаров В.В. Нелинейная лазерная флуориметрия сложных органических соединений // ДАН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 338–341.
 47. Аброскин А.Г., Нольде С.Е., Фадеев В.В. и др. Флуориметрия сложных органических комплексов в природных водах с помощью лазеров с перестраиваемой частотой // 12-я Всесоюзная конференция по когерентной и нелинейной оптике. Ч. II. М., 1985. С. 560.
 48. Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А. Спектро-флуориметрические методы анализа ароматических углеводородов в природных и технологических средах. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 215 с.
 49. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 1–9. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
 50. Владимиров А.М., Ляхов Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 424 с.
 51. Люцарев С.В., Чубаров В.В. Методы измерения содержания растворенного углерода в природных средах // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 479–491.
 52. Океанология. Биология океана. Т.1 Биологическая структура океана / Под ред. М.Е. Виноградова. М.: Наука, 1977. 427 с.
 53. Виноградова М.Е. Роль океана в жизни и сохранении биосферы Земли // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века. М.: Наука, 1998. С. 99–148.
 54. Патин С.А. Химическое загрязнение и его влияние на гидробионтов. Океанология. Биология океана. Биологическая продуктивность океана / Под ред. А.С. Монины. М.: Наука. Т. 26. 1977. С. 322–331.
 55. Бунин Д.К., Горбунов М.Ю. и др. Дистанционный лазерный мониторинг фитопланктона и органических примесей в прибрежной полосе черноморского побережья России // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1993. Т. 29. № 1. С. 131–139.
 56. Mutola P.B., Jaretto J., Brown C.A. Multiwavelength laser induced fluorescence of algae in-vivo: a new remote sensing technique // II Joint Conf. on sensing of environmental pollutants. Washington D.C., 1973. P. 53.
 57. Dudelzak A.E., Babichenko S.M., Poryukina L.V. Total luminescence spectroscopy for remote laser diagnostics of natural water conditions // Appl. Optics. 1991. V. 30. № 4. P. 453–457.

58. *Knorr F.J., Harris J.M.* Resolution of multicomponent fluorescence spectra by an emission wavelength-decay time data matrix // *Annal. Chem.* 1981. V. 53. № 2. P. 272–276.
59. *Фадеев В.В.* Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов // *Квантовая электроника.* 1978. Т. 5. № 10. С. 2221.
60. *Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E.* Remote sensing of subsurface water temperature by Raman scattering // *Appl. Optics.* 1979. V. 18. № 11. P. 1732–1745.
61. *Научно-технический отчет.* Институт общей физики АН СССР. М., 1983.
62. *Голубцов П.В., Гоголинская Т.А., Ким Е.М. и др.* Дистанционное определение t° и $S^{\text{‰}}$ морской воды по спектрам КР света // *Морской гидрофизический журнал.* 1988. № 1. С. 59–64.
63. *Прохоров А.М., Власов Д.В., Ципенюк Д.Ю., Букреев В.С.* Исследование возможности дистанционного определения содержания железа в морской воде по спектру лазерного про-
боя // *Журнал прикладной спектроскопии.* 1991. Т. 55. № 2. С. 313–314.
64. *Власов Д.В., Прохоров А.М., Ципенюк Д.Ю., Букреев В.С.* Дистанционный элементный анализ состава морской воды по эмиссионному спектру лазерной плазмы // *Оптика атмосферы и океана.* 1991. Т. 4. № 4. С. 445–446.
65. *Бункин А.Ф., Резов А.В., Ципенюк Д.Ю.* Дистанционный элементный анализ вещества в натуральных условиях с помощью лазерного комплекса вертолетного базирования // *ЖТФ.* 1994. Т. 64. Вып. 3. С. 195–200.
66. *Букин О.А., Занин Ю.А., Свириденков Э.А. и др.* Определение макросостава морской воды методом лазерной искровой спектроскопии // *Оптика атмосферы и океана.* 1992. Т. 5. № 11. С. 1213–1216.
67. *Беляев В.И., Кондуфорова Н.В.* Математическое моделирование экологических систем шельфа. Киев: Наукова думка, 1990. 242 с.

V.G. Bondur, E.V. Zubkov. **Lidar methods of remote sensing of pollution in the upper oceanic layer.**

Main lidar methods for sensing the pollution of water medium, as well as the physical effects, which they are based on, are under analysis. These methods are rather promising for monitoring the pollution of the upper oceanic layer due to their capability to control a great variety of fields (physical, chemical, and biological). The potentiality of the methods is validated by results of the field experiments, as well as laboratory and theoretical investigations.