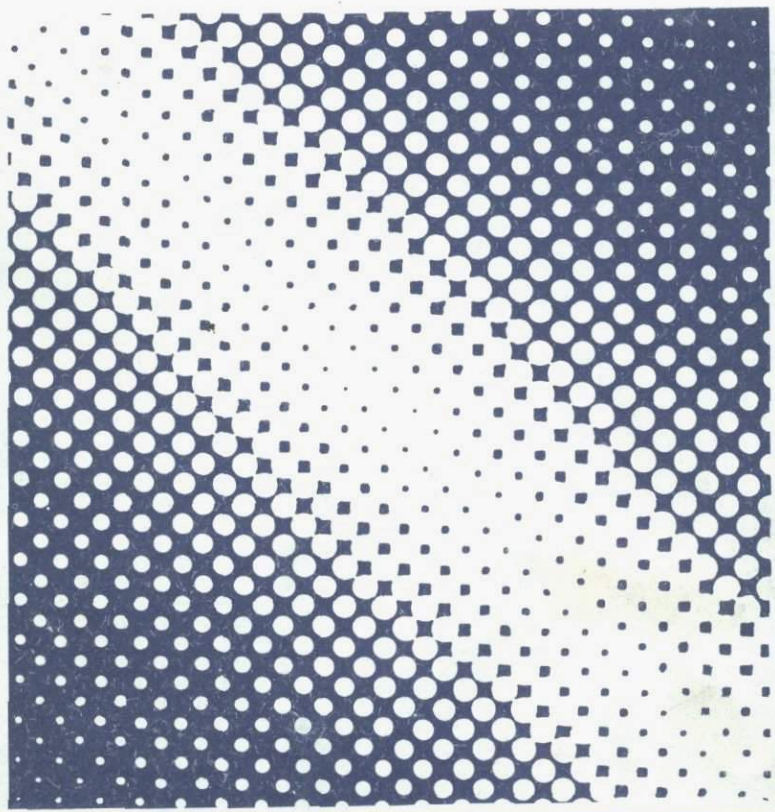


---

# Комплексный дистанционный мониторинг озер



АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

# Комплексный дистанционный мониторинг озер

*Сборник научных трудов*

Ответственный редактор  
академик  
К. Я. КОНДРАТЬЕВ



ЛЕНИНГРАД  
ИЗДАТЕЛЬСТВО „НАУКА“  
Ленинградское отделение  
1987



4820

Рецензенты

С.В. Рянжин, Н.Е. Тер-Маркорянц

## ВВЕДЕНИЕ

Внутренние водоемы представляют собой весьма уязвимую систему, так как по своему гидрографическому положению являются естественным коллектором для питающих их водосборов. Самоочистительный потенциал озер действует до тех пор, пока не нарушена его экосистема. Однако в последние годы на больших пресноводных водоемах СССР проблема качества вод связана прежде всего с проблемой эвтрофирования, обусловленного совместным действием разнообразных факторов. В число неблагоприятных факторов входит не только антропогенное загрязнение водосбора и попадание излишков биогенных и других, не свойственных в естественных условиях элементов в водоем, но и нарушение его естественного гидрологического режима, вызванного зарегулированием стока, подпором плотин и пр. Таким образом, хотя изменение качества воды это прежде всего изменение ее биохимического состояния, тем не менее причиной этих явлений может быть не только биохимическое загрязнение. Необходима детальная и оперативная информация о происходящих в водоеме процессах, что далеко не всегда можно обеспечить традиционными наземными методами даже на тех водоемах, где регулярно проводятся исследования.

Дистанционные методы исследования (активные и пассивные) природных объектов обеспечивают большую обзорность, возможность повторного получения данных через определенные промежутки времени, возможность применения комплексного анализа и оценки временной динамики развития явления. Все шире они применяются и для водных объектов. Однако в настоящее время не существует общепринятых теоретических, методических и аппаратных разработок для решения этой задачи.

Перед Лабораторией дистанционных методов Института озераведения АН СССР, организованной в 1983 г., была поставлена задача — разработать дистанционные методы слежения за эвтрофированием озер. Многофакторность процесса эвтрофирования и многообразие его связей с другими многочисленными процессами привели к необходимости разработки ряда отдельных специфических дистанционных методик для слежения за эвтрофированием и определяющими его факторами на различных стадиях развития этого процесса. Отдель-

ные методики затем могут быть объединены в целевой комплекс, пригодный для оперативного контроля за водоемами.

Сопоставление отдельных дистанционных методик показало, что их возможности слежения за состоянием вод различны: у одних недостаточна точность измерений, у других малое разрешение, третьи недостаточно обзорны, т.е. нет универсального метода, который мог бы рассматриваться как пригодный в любых условиях. Первый опыт применения дистанционных методов для изучения внутренних водоемов привел также к выводу о необходимости критического анализа традиционных судовых наблюдений, так как использование стандартных измерительных комплексов не решает полностью задачи судовых наблюдений применительно к разработке дистанционных методов. Оказалось, что их недостатки в отдельных случаях настолько значимы, что использование существующих методов в качестве эталонных для калибровки данных дистанционных методов не всегда обосновано. В связи с этим возникает задача разработки комплекса методов дистанционных наблюдений, в котором оптимально сочетались бы достоинства отдельных методов.

Говоря об основных достоинствах дистанционных методов — их обзорности и информативности, — следует иметь в виду, что эти достоинства могут быть реализованы только при наличии соответствующей информационно-аналитической базы. Оперативность дистанционных методов может быть реализована в полной мере лишь в том случае, если будет создана единая система, включающая комплекс сбора и передачи информации (носитель-измеритель-передатчик) и комплекс приема и обработки информации (приемник-ЭВМ), сосредоточенные в одном центре. Решение подобной задачи требует самостоятельных, глубоких проработок и больших материальных затрат, но без организации информативно-аналитической системы оперативность дистанционных методов окажется нереализованной.

Перечисленные вопросы не исчерпывают проблемы дальнейшей разработки и внедрения дистанционных методов в озероведении, но, по-видимому, являются главными на данном этапе. Решение их возможно только на основе тесной кооперации многих научно-исследовательских организаций, обладающих соответствующей научно-технической базой, контингентом специалистов и, главное, заинтересованных в решении поставленных задач. Настоящий сборник является первой попыткой обобщить имеющиеся на сегодняшний день теоретические и практические возможности использования дистанционных методов для изучения озер.

#### СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ААНИИ — Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт  
ВНИИВО — Всесоюзный научно-исследовательский институт по охране вод (Харьков)

- ВНИИСХМ – Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (Обнинск)
- ВЦ СО АН СССР – Вычислительный центр Сибирского отделения АН СССР (Новосибирск)
- ГГО – Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
- ГосНИЦИПР – Государственный научно-исследовательский центр по исследованию природных ресурсов (Москва)
- ГХИ – Гидрохимический институт (Ростов-на-Дону)
- ИБ АН УССР – Институт ботаники им. Н.Г. Холодного АН УССР (Киев)
- ИНОЗ АН СССР – Институт озераедения АН СССР
- ЛПИ – Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина
- ЛЭТИ – Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина)
- НИИФ ЛГУ – Научно-исследовательский институт физики Ленинградского государственного университета им. А.А. Жданова
- Новочеркасское ВВУС – Новочеркасское Высшее военное училище связи
- ОВМ АН СССР – Отдел вычислительной математики АН СССР (Москва)
- ОВП Карельск. фил. АН СССР – Отдел водных проблем Карельского филиала АН СССР (Петрозаводск)
- ОКБ „Интеграл“ ЛГУ – Опытнo-конструкторское бюро „Интеграл“ Ленинградского государственного университета им. А.А. Жданова
- ПИНРО – Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (Мурманск)
- СЗУГКС – Северо-западное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды
- СКТБ „Аэрозоль“ – Специальное конструкторско-технологическое бюро аэрозольных приборов и улавливателей (Ереван)

# 1. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОЗЕРНЫХ ВОД, АНТРОПОГЕННОЕ ЭВТРОФИРОВАНИЕ И ЕГО ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ

---

К.Я. Кондратьев, Г.В. Дружинин

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЭВТРОФИРОВАНИЕМ ОЗЕР

Одной из основных проблем современного озероведения является исследование процесса эвтрофирования озер. Этот процесс, протекающий в естественных условиях замедленными темпами, за последние десятилетия значительно интенсифицировался под влиянием антропогенных факторов, скорость его развития стала угрожающей для многих озер мира, в том числе и для ряда озер СССР. В полной мере это относится к Ладожскому озеру, которое было выбрано в качестве объекта исследований по нескольким причинам.

1. Процесс эвтрофирования озер на современном этапе уже достаточно ярко выражен, что определяет, во-первых, необходимость слежения за динамикой эвтрофирования и, во-вторых, создает подходящие условия для разработки методических вопросов исследования эвтрофирования.

2. Размеры озера достаточно велики, что позволяет испытать некоторые дистанционные методики, разработанные для океанов и морей, с последующей их адаптацией к озерным условиям.

3. Все результаты наблюдений, получаемые в процессе методических разработок, могут быть немедленно использованы для практических мероприятий по сохранению качества вод Ладожского озера.

4. Озеро является удобным полигоном для разработки дистанционных методов, которые впоследствии могут быть использованы на морях.

Таким образом, комплексные исследования Ладожского озера обеспечивают взаимную заинтересованность в тесном сотрудничестве лимнологов и специалистов по дистанционным методам. Однако, несмотря на это, первый же опыт организации совместных исследований выявил их большую сложность уже на уровне постановки задачи. Основная причина затруднений — недостаточное взаимное понимание, которое нередко возникает на стыке различных отраслей науки.

Для того чтобы снять подобные затруднения, в Институте озераведения АН СССР был организован постоянно действующий семинар с участием лимнологов и специалистов по дистанционным методам, основная задача которого — выявление конкретных требований к исследованиям эвтрофирования озер и сопоставление их с реальными возможностями дистанционных методов. Хотя решение этой задачи потребует определенных усилий, однако уже сейчас сказался основной положительный результат работы семинара — сложный процесс эвтрофирования оказался возможным представить в виде составляющих его компонентов, но для каждого из них необходимо разработать специфические методы дистанционной индикации.

Сложность процесса эвтрофирования озер привела к необходимости комплексного подхода к его исследованию, которое осуществляется совместными усилиями более 20 научно-исследовательских и научно-производственных организаций 6 крупнейших ведомств страны: Академии наук СССР, Госкомгидромета СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР, Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР, Министерства рыбного хозяйства СССР и Министерства сельского хозяйства СССР.



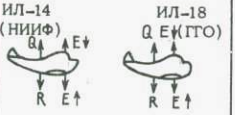

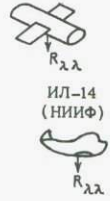

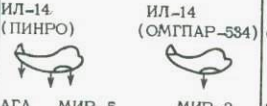
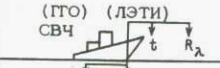

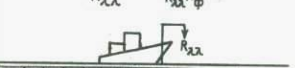
Несмотря на то что организация взаимодействия такого количества соисполнителей очень сложна, преимущества ее очевидны — уже на первом этапе исследований (1983–1984 гг.) наблюдения на Ладожском и Онежском озерах выполнялись синхронно различными методами при помощи 5 научно-исследовательских судов, 6 самолетов, 2 вертолетов с использованием космических данных, получаемых с различных спутников. На приведенной схеме показаны взаимодействие соисполнителей, определяемые характеристики и средства их наблюдений.

Процесс эвтрофирования интенсифицируется поступлением биогенов, приносимых в озеро с водами притоков, сточными водами и атмосферными осадками. Отсюда возникла первая задача — «дистанционные методы слежения за поступлением и распространением биогенов в озеро».

Сразу же следует отметить, что, поскольку наличие биогенных элементов в воде непосредственно дистанционными методами не определяется, возник вопрос косвенной индикации их распространения путем слежения за водами притоков и сточными водами. Эта работа выполнялась совместно с ВНИИВО, НИИФ ЛГУ и ОКБ «Интеграл» ЛГУ по схеме, деталь «А».

Наиболее сложной частью этой задачи является контроль за поступлением биогенов из атмосферы посредством сухого и влажного осаждения. Практических результатов по этой проблеме пока нет, но существуют теоретические разработки с конкретными предложениями по поводу подходов к исследованию этой проблемы, выполненные В.Н. Адаменко.

Контроль за распространением и поступлением биогенных элементов имеет наибольшее значение для тех озер, в которых их критическое содержание еще не достигнуто, например для Онежского озера и Байкала. В водах Ладожского озера критический уровень со-

Поступление и распространение биогенных элементов в озере	Формирование зон, оптимальных для цветения			Регистрация зон цветения
	Распределение солнечной радиации	Распределение света в воде	Термические неоднородности	
<p><b>А</b></p> <p>Метеор-природа „Фрагмент“</p> <p>ИЛ-14 (НИИФ)      АН-30 (ГосНИЦИПР)</p>  <p>МКФ-6</p> <p>(„Интегра“ (ВНИИСХМ))</p>  <p>С<sub>хл</sub> Р Q<sub>2</sub> рН Цб D<sub>c</sub> Q<sub>2</sub> σ t P N ИР</p> <p>(ВНИИВО, ИНОЗ) (ААНИИ)</p> <p>„Дерюгин“      „Бит“</p>	<p><b>Б</b></p> <p>ИЛ-14 (НИИФ)      ИЛ-18 Q Е К ГТО</p>  <p>(ИНОЗ)</p>  <p>D<sub>c</sub> в σ t</p> <p>(ИНОЗ)</p> <p>„Лимня“</p>	<p><b>В</b></p> <p>ИЛ-14 (НИИФ)</p>  <p>(ГХИ)</p>  <p>С<sub>хл</sub> р рН Цб D<sub>c</sub> в σ t μ T<sub>λ</sub> Z</p> <p>(ВНИИВО, ИНОЗ) (ОВП КФАН)</p> <p>„Лимня“ „Талац“ „Дерюгин“ „Бит“</p>	<p><b>Г</b></p> <p>ИЛ-14 (ПИНРО)      ИЛ-14 (ОМГПАР-534)</p>  <p>АГА МИР-5 МИР-3      МИР-3</p> <p>(ГТО) (ЛЭТИ) СВЧ</p>  <p>t<sub>g</sub> t<sub>p</sub></p> <p>(ИНОЗ)</p> <p>„Талац“ „Дерюгин“ „Бит“</p>	<p><b>Д</b></p> <p>АН-2 (ВНИИСХМ)      ИЛ-14 (ПИНРО)      ИЛ-14 (НИИФ)</p>  <p>МИ-2 (ВНИИСХМ)      (ГХИ)      МИ-8 (СИБ АН УССР)</p>  <p>T<sub>λ</sub> С<sub>хл</sub> р Q<sub>2</sub> Цб D<sub>c</sub> в σ t      С<sub>хл</sub> φ</p> <p>(ВНИИВО, ИНОЗ)      (ПИНРО)</p> <p>„Лимня“ „Дерюгин“ „Талац“ „Бит“</p>

## СОСТАВ НАБЛЮДЕНИЙ

Судовые наблюдения контактные	Судовые наблюдения неконтактные	Самолетные и вертолетные наблюдения
$t$ - температура воды	$Q, D, R_{\lambda}, Z$ - компоненты радиационного баланса	$R_{\lambda\lambda}$ - яркость водной поверхности
$\sigma$ - электропроводность	$P, R_t, I$ - характеристики поляризации восходящего излучения	$Q, R_{\lambda}, E$ - компоненты радиационного баланса
$\nu$ - физическая прозрачность	$R_{\lambda}$ - яркость водной поверхности в диапазоне 350-800 нм	$t_p$ - температура поверхности воды (МИР-3, МИР-5, АГА)
$D_C$ - глубина видимости белого диска	$R_{\lambda}$ - яркость водной поверхности в диапазоне 350-750 нм	Многозональная съемка МКФ-8
$ЦВ$ - цветность	СВЧ - радиометрия	$N_{\Phi}$ - наведенная флуоресценция
$pH$ - концентрация водородных ионов		Данные космических наблюдений
$O_2$ - содержание кислорода		ИСЗ - Метеор-Природа: дубль-негативы
$\rho$ - концентрация взвеси (минеральной, органической и суммарной)		водной поверхности в разных зонах спектра
$C_{шл}$ - концентрация хлорофилла (суммарная, $a''$ , $b''$ , $c''$ )		- МСУ-С: дубль-негативы среднего разрешения
$C_{шл\Phi}$ - концентрация хлорофилла, определенная флуориметрическим методом		- МСУ-М: дубль-негативы малого разрешения
$T_{\lambda}$ - пропускание света в воде		ИСЗ - NOAA: цифровая информация о температуре водной поверхности
$Z$ - глубина освещенности (1% и 10%)		
$\mu$ - проникновение света на различных глубинах		
ИР - индикатрисы рассеяния		

держания биогенов уже достигнуто, и оно может „зацвести“ в любой своей части при спокойной погоде и оптимальном сочетании тепла и света в воде. С этим связана вторая группа задач — „дистанционные методы слежения за формированием зон, оптимальных для цветения“, в которой рассматриваются три основных вопроса:

1. Распределение радиационного баланса и его компонентов по акватории. Эта работа выполнялась совместно с ЛЭТИ, ГГО и НИИФ ЛГУ по схеме, деталь „Б“.

2. Оптические свойства озерных вод и определяющие их факторы. При этом рассматривалась совокупность методов индикации тех характеристик, которые ответственны за формирование гидрооптических свойств озерных вод (содержание минеральных и органических взвесей, окрашивающих веществ), исследовались пространственно-временная изменчивость прозрачности, распределение подводной освещенности. Основные цели: а) построение оптической модели озера и применение ее для различных имитационных численных экспериментов; б) на основе результатов численного моделирования разработка дистанционных методов картирования оптических неоднородностей озерных вод. В этих работах участвовали НИИФ ЛГУ, ВНИИВО, ААНИИ, Карельск. фил. АН СССР, ВЦ СО АН СССР, ПИНРО. Работы выполнялись по схеме, деталь „В“.

3. Термическая структура озерных вод. Рассматривался ряд вопросов практического применения дистанционных методов термосъемки: оценивались их чувствительность, точность, разрешающая способность и оперативность. Были получены материалы, позволяющие сравнивать по этим критериям ряд дистанционных методик. Для этого было организовано несколько многоступенчатых экспериментов по схеме, деталь „Г“, в которых принимали участие ПИНРО, ЛПИ, ЛЭТИ и СЗУ Госкомгидромета.

Следует подчеркнуть, что практическое применение рассматриваемых методов может привести к решению очень важной для озераведения задачи — выявлению зон с потенциальной угрозой цветения воды еще до его начала. В этом случае может быть поставлен и исследован существенно важный вопрос: почему в одних случаях оптимальные условия для цветения реализуются, а в других нет. Это позволит выявить пока еще неизвестные факторы, обуславливающие цветение природных вод.

При наличии оптимальных условий в озере начинается лавинообразное развитие фитопланктона — собственно цветение воды. Это происходит, как правило, дважды в год — весной и осенью. В первом случае цветут диатомовые, а во втором — сине-зеленые водоросли. Весенние вспышки фитопланктона дистанционными методами пока еще не наблюдались, а работы по дистанционным методам индикации осеннего цветения выделены в отдельную задачу — „дистанционные методы индикации хлорофилла в озерных водах“, которая включает ряд взаимосвязанных вопросов.

1. Теоретический анализ возможностей дистанционной индикации содержания хлорофилла в озерных водах.

2. Совершенствование контактных методов определения содержания хлорофилла в воде.

3. Разработку дистанционного метода восстановления хлорофилла на основе координат цвета.

4. Спектрометрические методы восстановления хлорофилла с использованием разнообразной аппаратуры („Вертикаль-1“, „К-3“, „Спектрофотометр“).

5. Методы восстановления хлорофилла посредством активной локации (лазерное возбуждение флуоресценции).

Эти работы выполнялись по схеме, деталь „Д“. В них принимали участие ВНИИСХМ, ГХИ, НИИФ ЛГУ, ПИНРО, ИБ АН УССР.

Содержание хлорофилла, полученное дистанционно, можно отнести лишь к небольшому приповерхностному слою воды, в котором формируется дистанционно регистрируемый сигнал. Однако в зависимости от ветровой обстановки и динамического состояния вод глубина распространения фитопланктона может быть значительной. Поэтому общая оценка содержания фитопланктона в озере без учета динамики, термического и светового режима толщи вод практически окажется некорректной, даже если количество планктона в поверхностном слое будет определено надежно. Отсюда следует необходимость постановки вопроса — „дистанционные методы индикации динамики, термики и светового режима толщи озерных вод“.

Актуальность постановки подобного вопроса подтверждается еще и тем, что факт цветения воды — не конечный результат процесса эвтрофирования и регистрация этого факта, следовательно, — не конечная задача. Дело в том, что в результате последующего распада фитопланктона может возникать дефицит кислорода в воде, вплоть до образования предзаморного или заморного состояния и связанных с ним явлений, т.е. возникают зоны с негативными изменениями качества вод, которые и представляют основную опасность и должны интересовать нас прежде всего.

Реальные основания для постановки вопроса о разработке методов дистанционной индикации динамических процессов в толще озер имеются, так как многие элементы динамики озерных вод обладают различными формами проявления на поверхности (циркуляция Лэнгмюра маркируется полосами пены, внутренние волны — штилевыми полосами-сликами, апвеллинг, весенний и осенний термобары — резкими контрастами температуры воды).

На пути решения обсуждаемого круга вопросов существует, однако, много трудностей. Несомненно, что решение поставленных задач возможно лишь на основе комплексного использования результатов имитационного моделирования данных прямых измерений (включая различные эмпирические корреляционные связи) и дистанционных методов.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА  
АНТРОПОГЕННОГО ЭВТРОФИРОВАНИЯ  
В БОЛЬШИХ ГЛУБОКИХ ОЗЕРАХ  
(НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА)

В последние годы чрезвычайно возрос научный и практический интерес к изменению трофического уровня (эвтрофикации) озерных экосистем. Это связано прежде всего с тем, что эвтрофикация пресноводных водоемов вызывает резкое ухудшение качества воды для различных целей водопользования. В настоящее время этим процессом охвачено около 90% озер мира. Повышенный интерес вызывает развитие процесса эвтрофикации в больших глубоких озерах, поскольку в них сосредоточен основной запас пресной воды, доступной для хозяйственного использования.

Лимнологические исследования последних десятилетий позволили установить зависимость между повышением трофического уровня озер (и связанных с ним нарушений в лимнических экосистемах, названных антропогенным эвтрофированием) и хозяйственным освоением их водосборных бассейнов, сопровождающимся увеличением сбросов в озерные воды различных минеральных и органических веществ, в том числе биогенных элементов (фосфор, азот).

Рост поступления и последующее увеличение концентрации биогенных веществ в озерной воде вызывает усиленное развитие автотрофных фотосинтезирующих организмов (фитопланктон и высшая водная растительность), причем для больших глубоких озер характерно преобладающее развитие фитопланктонных водорослей.

В соответствии с увеличением объема новообразованного автотонного органического вещества возрастает и объем его разложения (бактериальная деструкция). В конечном итоге в озерной экосистеме существенно меняется соотношение между процессами продукции и деструкции, что сопровождается увеличением биохимического контраста между верхним (трофогенным) и нижним (трофолитическим) слоями воды, усиленным накоплением органического вещества в донных отложениях и изменением газового режима во всем объеме озерной воды.

Таким образом, можно сказать, что процесс эвтрофирования меняет не только продукционные характеристики озерной экосистемы, но и весь комплекс лимнических процессов и, как следствие, — ряд основных характеристик и параметров всей толщи озерной воды (например, прозрачность воды, ее цветность, характеристики взвесей и т.д.).

Процесс антропогенного эвтрофирования большого глубокого озера (например, Ладожского) имеет ряд характерных особенностей. В своем развитии он проходит несколько стадий, причем на каждой роль отдельных факторов и связанных с ними лимнических процессов может меняться по значимости.

Первой стадией процесса эвтрофирования можно считать увеличение поступлений биогенных элементов (фосфор) с водосбора (за счет развития хозяйственной деятельности или роста численности городского населения) при сравнительно низких концентрациях этих элементов в основной озерной водной массе. Биогенные элементы поступают в озеро либо с водами притоков, либо со сточными водами крупных предприятий или городов, расположенных непосредственно на побережье озера. Эвтрофирование озера на этой стадии проявляется в росте продуктивности фитопланктона, приуроченном к зонам распространения вод притоков или сточных вод. Обычно в начале своего развития процесс эвтрофирования захватывает заливы, губы или достаточно ограниченные прибрежные участки. В связи с этим одной из существенных задач на этом этапе является исследование характера распространения вод притоков в озере в различные сезоны года.

Весной, после освобождения озера ото льда, в результате интенсивного прогрева и неоднородностей рельефа дна в больших глубоких озерах формируется фронт термического бара (Тихомиров, 1968), разделяющий теплоактивную и теплоинертную области озера. Воды притоков, формирующие первичные водные массы, в этот период сосредоточены в теплоактивной области, где создается повышенное содержание биогенных элементов, благоприятное для интенсивного развития планктонных водорослей.

В летний период, после исчезновения фронта термического бара, в озере формируется общеозерная циркуляция (Охлопкова, 1966), выравнивающая (снижающая) концентрации биогенных элементов за счет перемешивания первичных водных масс с основной озерной водной массой с низкими концентрациями биогенных элементов. В тот же период, по мере уменьшения водного притока, снижается и поступление в озеро биогенных веществ с водосбора. В случае поступления сточных вод непосредственно в озеро этого снижения может и не происходить. Воды притоков в летний период на этой стадии будут способствовать интенсивному развитию планктонных водорослей в локальных прибрежных участках или в изолированных заливах и губах.

В осенний период, в условиях интенсивного ветрового перемешивания, происходит полное выравнивание концентраций биогенных элементов во всей водной толще озера, что в сочетании с неблагоприятными погодными условиями приводит к исчезновению предпосылок для интенсивного развития фитопланктона в этот период.

Вторая стадия процесса эвтрофирования большого глубокого озера начинается с того момента, когда концентрация биогенных элементов, в подавляющем большинстве случаев общего фосфора, достигает в основной озерной водной массе критического уровня (достаточно для интенсивного развития фитопланктона) – 20–25 мкг P/л. Время перехода от первой стадии эвтрофирования ко второй определяется тремя основными факторами: 1) уровнем поступления фосфора с водосбора, 2) характером крупномасштабного переноса озерных вод и 3) объемом озера.

Чем выше уровень поступления фосфора в озеро и чем интенсивнее процессы переноса его по акватории, тем быстрее нарастает концентрация фосфора в водоеме. В случае наличия изолированных заливов и губ с замедленным водообменом с основной озерной водной массой высокий уровень продуктивности фитопланктона в этих заливах может поддерживаться долгое время, в то время как основной плёс озера при этом будет оставаться на низком уровне продуктивности. Если обогащенные фосфором воды притоков ежегодно участвуют в полном озерном перемешивании, как это происходит, например, в Ладожском озере, то рост концентрации фосфора до критического уровня будет происходить значительно быстрее.

Поскольку на второй стадии процесса антропогенного эвтрофирования большого глубокого озера высокие концентрации фосфора характерны для всей его акватории, то зоны влияния вод притоков перестают отличаться высокими продукционными характеристиками. Более того, в отдельных случаях высокая мутность речных вод может значительно снижать уровень продуктивности фитопланктона в этих зонах, несмотря на высокие концентрации биогенных элементов. Основными факторами, определяющими в этот период интенсивность развития фитопланктона, становятся температура воды и прозрачность, от которой зависит глубина фотического слоя.

Таким образом, зонами интенсивного развития фитопланктона на этой стадии становятся районы благоприятного сочетания двух факторов: высокой температуры и высокой прозрачности. Например, в Ладожском озере в разгар вегетационного периода (август) массовое развитие планктонных водорослей („цветение” воды) отмечается по всей акватории, за исключением северо-западного глубоководного района, где в течение всего периода открытой воды сохраняется пониженный температурный фон. Характерно, что максимальные продукционные характеристики для сине-зеленых водорослей отмечаются в северной и центральной частях озера, где непосредственное влияние притоков практически отсутствует.

Именно поэтому на этой стадии процесса антропогенного эвтрофирования большого глубокого озера чрезвычайно важны регулярные и частые (до еженедельных) съемки озерной акватории с регистрацией температуры воды и ее оптических характеристик, позволяющих судить о прозрачности озерной воды. Это позволило бы оперативно следить за динамикой формирования продуктивных зон и выявлять районы, потенциально благоприятные для возникновения максимальных продукционных величин („цветение”). Следует заметить, что в тот период, когда „цветение” потенциально может охватывать всю акваторию озера, существенным фактором, сдерживающим развитие фитопланктона, является ветровая деятельность, разрушающая колонии сине-зеленых водорослей. Регулярное сопоставление потенциальных зон интенсивного развития фитопланктона с реальными районами „цветения” (по хлорофиллу) позволило бы глубоко и детально изучить влияние погодных условий на интенсивность развития фитопланктона, вплоть до получения количественных оценок.

На третьей стадии процесса эвтрофирования в больших глубоких озерах, когда продуцирование органического вещества становится чрезвычайно высоким, резко увеличивается потребление кислорода в гипolimнионе озера. В связи с этим становится чрезвычайно важным выявление зон, где идет активное накопление автохтонного органического вещества в гипolimнионе, поскольку в большом глубоком озере это накопление, а следовательно, и гипolimниальное потребление кислорода пространственно неоднородно.

По материалам исследований последних лет, проводимых на Ладожском озере, наиболее интенсивно накопление органического вещества в гипolimнионе происходит в зоне глубин 20–60 м, где проходит при своем развитии фронт термического бара. Мощные вертикальные движения, возникающие в этой зоне, вовлекают в гипolimнион вместе с аллохтонным органическим веществом, поступающим с притоками, новообразованное автохтонное органическое вещество весеннего фитопланктона теплоактивной области.

Следует заметить, что на этой стадии антропогенного эвтрофирования в больших холодноводных озерах сукцессия (смена видов фитопланктона) приводит к восстановлению доминантной роли диатомовых водорослей в создании годовой первичной продукции. Для водоемов этого типа характерен низкий температурный фон на протяжении большей части вегетационного периода, что предопределяет большую конкурентоспособность холодноводных диатомовых водорослей по сравнению с теплолюбивыми видами зеленых и сине-зеленых. Весенне-осенняя продукция диатомовых водорослей на этой стадии развития эвтрофирования составляет 50–60% общегодовой. Только в июле и августе при интенсивном прогреве эпилимниона и благоприятных погодных условиях создается возможность для бурного развития сине-зеленых водорослей, вызывающих эффект „цветения“ воды. Следует учитывать, что именно за счет весеннего развития диатомовых водорослей происходит основное поступление в гипolimнион автохтонного органического вещества, в связи с чем количественная оценка фитопланктонных водорослей весной в теплоактивной области чрезвычайно важна для анализа последующих изменений в озерной экосистеме. В другие периоды года автохтонное органическое вещество может поступать в гипolimнион при сгоннонагонных явлениях в зонах прибрежного даунвеллинга в том случае, если в этих местах скапливается достаточно большое количество планктонных водорослей. Следовательно, очень важно при развитии „цветения“ воды по акватории озера в летний период проследить перемещение планктонных полей и выявлять места их скопления.

Практика лимнологических исследований показывает, что традиционные методы проведения натурных наблюдений позволяют достаточно глубоко и детально изучать процесс антропогенного эвтрофирования и делать определенные выводы о характере и скорости его развития в водоеме в целом. Но в то же время проведение исследовательских работ с одного или нескольких судов, даже при экспресс-методах сбора информации, занимает много времени (несколько суток) и не всегда возможно из-за погодных условий. Кроме того,

большинство гидрохимических и гидробиологических параметров требует дальнейшей лабораторной обработки, которая далеко не всегда может быть выполнена оперативно.

Современный уровень исследований процесса антропогенного эвтрофирования большого глубокого озера, имеющего важное водохозяйственное значение, требует регулярных и частых наблюдений за рядом лимнологических параметров по всей акватории озера в течение всего года. Такая задача может быть решена при активном использовании дистанционных методов наблюдений (самолет, вертолет, спутник). Введение в лимнологическую практику дистанционных методов дает существенный эффект при соблюдении ряда определенных требований, выполнение которых необходимо для изучения сложного и многофакторного процесса, которым является эвтрофирование большого глубокого озера.

Одним из основных требований является регулярность и оперативность получения информации. В отдельные периоды требуемая дискретность наблюдений за температурой воды, прозрачностью и концентрацией хлорофилла по акватории озера может равняться 1–2 сут. Оперативность проведения подобных съемок требует столь же быстрого получения заказчиком обработанной информации, в противном случае, если между наблюдениями и выдачей результата будет возникать временной разрыв, в несколько раз превышающий дискретность наблюдений, такие работы потеряют смысл.

Второе важное требование обращено к точности измерения лимнологических параметров. Поля этих параметров, измеряемые дистанционно, должны быть согласованы с данными, получаемыми контактными методами, поэтому точность дистанционных измерений должна быть по крайней мере не ниже общепринятых в лимнологической практике (по температуре воды – 0,1 °С, по прозрачности – 0,2 м (по диску), по хлорофиллу – 0,1 мкг/л).

Даже столь небольшой набор лимнологических параметров, измеряемых часто, регулярно и точно, мог бы существенно углубить и уточнить изучение процесса антропогенного эвтрофирования больших глубоких озер, проследить за динамикой его развития от года к году и по сезонам, надежно привязать проявления этого процесса к климатическому и погодному фону и позволить заблаговременно прогнозировать неблагоприятные проявления эвтрофирования во времени и территориально.

Следует отметить, что плодотворный итог в исследовании эвтрофирования больших озер (и даже во всем комплексе лимнологических исследований) может быть достигнут только при тесном контакте и сотрудничестве специалистов дистанционной техники с гидрологами, гидрохимиками, гидробиологами, изучающими озерные процессы традиционными методами и имеющими определенный лимнологический и экологический опыт, а также при подробном и открытом обсуждении получаемых результатов.

## Л и т е р а т у р а

- О х л о п к о в а А.Н. Течения Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 265-278.
- П е т р о в а Н.А. Сравнительная роль сезонных комплексов водорослей планктона при антропогенном эвтрофировании больших озер. - В кн.: Лимнология горных водоемов: Тез. докл. Всесоюз. совещ. по лимнол. горных водоемов. Ереван, 1984, с. 239, 240.
- Т е р ж е в и к А.Ю., К р ю ч к о в А.М., Г у с а к о в Б.Л., А н т о н о в С.Е. Роль водных масс в процессе эвтрофирования Ладожского озера. - В кн.: Антропогенное эвтрофирование природных вод: Тез. докл. Третьего всесоюз. симп. по антропогенному эвтрофированию водоемов, Черноголовка, 1983, с. 168-170.
- Т и х о м и р о в А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера. - В кн.: Тепловой режим Ладожского озера. Л., 1968, с. 144-217.

Г.В. Дружинин

### ПЕРВАЯ СТАДИЯ ЭВТРОФИРОВАНИЯ - ПОСТУПЛЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРЕ

Ускорение процесса эвтрофирования стимулируется поступлением биогенных элементов, в основном азота и фосфора, которые могут проникать в озерные воды с водами притоков, со сточными водами, склоновым стоком, из донных отложений, а также с атмосферными осадками. В зависимости от путей попадания в озеро биогенных элементов в нем возникают районы, требующие особого внимания.

Основная часть биогенных элементов поступает в Ладожское озеро с водами притоков и сточными водами (Расплетина, 1982). Наиболее значительными в этом отношении являются воды рек Волхова, Сяси и Олонки, дренирующие большие площади удобряемых и мелиорированных сельскохозяйственных угодий и включающие промышленные стоки Волховского промышленного комплекса и Сясьского бумажного комбината. Поэтому основное внимание было уделено исследованию района Волховской и Свирской губ и восточного побережья Ладожского озера.

Биогенные элементы дистанционными методами непосредственно не фиксируются, но распространяются они в составе приточных вод (речных и сточных вод, попадающих в озеро или непосредственно, или с теми же речными водами). Приточные воды имеют надежные трассеры в виде взвешенных и растворенных окрашивающих веществ, поэтому слежение за распространением биогенных элементов можно осуществлять посредством слежения за распространением при-

точных вод. Наиболее часто приточные воды отличаются от озерных по значениям цветности, мутности, электропроводности, температуры, содержанию растворенного кислорода. По мере распространения в озере они разбавляются и трансформируются, при этом контрасты между приточными и озерными водами сглаживаются и исчезают. Скорость выравнивания контрастов для различных характеристик различна. Сточные воды, обладающие повышенной (относительно озерных вод) температурой в районе сточного коллектора, уже на первых километрах распространения в озере становятся неотличимыми от озерных, тогда как воды с повышенной электропроводностью могут различаться в водах озера на удалении до 50–70 км от места сброса (Дружинин, 1984). Поэтому необходимо выявление наиболее консервативных характеристик вод, способных длительное время сохранять контраст; кроме того, эти характеристики должны поддаваться методам дистанционной индикации (прямой или косвенной).

Возможность дистанционного слежения за приточными водами зависит также от способа их распространения в толще озерных вод (по поверхности, во взвешенном состоянии или в придонных горизонтах). Например, хорошо различимые по мутности, но более плотные стоки Кондопожского ЦКБ (Онежское озеро) при нагонных ветрах распространяются в придонном слое и, следовательно, не могут фиксироваться дистанционно (Дружинин и др., 1984).

Таким образом, дистанционное слежение за распространением биогенных элементов, находящихся в составе приточных вод, возможно при следующих граничных условиях: а) до исчезновения контрастов между приточными и озерными водами, б) до момента перехода потока приточных вод к взвешенному или придонному способу распространения. Граничные условия зависят от сезонов года (для вод притоков) и технологии и цикличности производства (для сточных вод). При этом расход или объем стока определяет мощность потока и, следовательно, ареал его распространения в озере; относительное содержание взвешенных и растворенных окрашивающих веществ – контраст с водами озера и соседних притоков; температура и электропроводность (как плотностные характеристики) – способ распространения потока в массе озерных вод. Отсюда объекты судовых и дистанционных измерений конкретизируются в следующем виде.

1. Биогенные элементы – азот и фосфор (основные элементы, вызывающие эвтрофирование озер).

2. Контрастные характеристики (гидрооптические) – глубина видимости белого диска, физическая прозрачность вод, цветность, содержание взвесей (в данном случае содержание взвесей рассматривается только как гидрооптически активное вещество – трассер, идентификатор).

3. Плотностные характеристики – температура и электропроводность, характеризующие поверхностный или придонный способ распространения потока.

4. Дистанционные характеристики — показатели цвета вод и яркость на длинах волн, информативность к трассерам.

Таким образом, общая задача дистанционной индикации поступления и распространения биогенных элементов в озерах распадается на ряд взаимосвязанных: 1) выявление связей между показателями содержания биогенов в воде и характеристиками-индикаторами приточных вод; 2) выявление связей между характеристиками-индикаторами, измеряемыми контактно и дистанционно; 3) установление трасс переноса и ареалов распространения приточных вод в зависимости от гидросиноптических ситуаций.

#### Л и т е р а т у р а

- Д р у ж и н и н Г.В. Мониторинг внутриконтинентальных водоемов. — Водные ресурсы, 1984, № 5, с. 12-19.
- Д р у ж и н и н Г.В., К о р о т к е в и ч О.Е., Р у м я н ц е в В.Б. Распределение и динамика водных масс в Кондопожской губе Онежского озера. — Водные ресурсы, 1984, № 1, с. 150-161.
- Р а с п л е т и н а Г.Ф. Изменение гидрохимического режима притоков в результате хозяйственной деятельности на водосборе. — В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982, 232 с.

В.Б. Румянцев

#### ОПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Первичные (ПГХ) и вторичные (ВГХ) гидрооптические характеристики озер, являющиеся объективными признаками, отличающими водные массы, направленно изменяются в результате естественного и антропогенного влияния на озерную экосистему. В современных условиях антропогенное влияние явственно выступает как один из сильнодействующих факторов, активно воздействующий на структурные и функциональные связи в системе лимнических процессов. Это положение достаточно четко прослеживается в Ладожском озере, Онежском, Белом, Севане и в большинстве озер мира (Россолимо, 1977; Дружинин, Румянцев, 1981; Goldman, Armstrong, 1969; Horie, 1969; Edmondson, 1972).

На возросшую биогенную нагрузку водная среда озер откликается прежде всего увеличением первичной продукции и возможным изменением видового разнообразия планктонных организмов (Петрова, 1982; Петрова, Расплетина, 1983), бактериофауны (Александрова, Капустина, 1982), что вызывает уменьшение прозрачности поверхностных слоев воды и сокращает этим фотическую (трофогенную) зону озера (Румянцев, Чехин, 1984). При этом соответственно изменяются спектральный состав проходящего на глубины солнечного

излучения, величина обратного рассеянного света и альbedo водной поверхности.

Эвтрофирование, менее заметный в начальной стадии процесс, сказывается на всей экосистеме озера, а загрязнение особенно резко проявляется в прибрежных зонах, заливах и шхерах озера. Поступление биогенных веществ в Ладожское озеро происходит локализовано - это Волховская губа, юго-восточный и шхерные районы, зона влияния р. Бурной, тем не менее в результате динамических процессов эвтрофированию подвержено все озеро (Тержевик и др., 1983). По первичной продукции Ладожское озеро из олиготрофного перешло в мезотрофный тип (Пырина, Трифонова, 1979; Петрова, Расплетина, 1983).

Именно по этим причинам в Ладожском озере за последние 20 лет прозрачность поверхностных слоев в период максимума развития планктона (август) уменьшилась. Так, в 1960-1962 гг. значения показателя общего ослабления ( $\epsilon$ ,  $m^{-1}$ ) находились в Ладожском озере в пределах 0,4-0,6  $m^{-1}$ , к 1978-1980 гг. они возросли до 0,8-1,0  $m^{-1}$ , а в отдельных случаях достигали 1,2-1,4  $m^{-1}$ . Относительная прозрачность за те же годы в центральных частях озера в августе уменьшилась с 4,0-4,5 до 3,0-2,5 м. Толщина трофогенной зоны в Ладожском озере, бывшая ранее в центральных частях не менее 10 м, в настоящее время сократилась на 1,5-2,0 м. При этом оптические градиенты из-за увеличения численности и локализации планктона в более тонком фотическом слое существенно возросли и стали составлять 1,2-2,0  $m^{-1}$  на метр глубины против 0,5-0,8  $m^{-1}$  в начале 60-х годов. Мутность поверхностных слоев воды ( $\rho$ , мг/л) также возросла (табл. 1).

Уменьшение прозрачности воды Ладожского озера вызвано увеличением количества взвешенных частиц биологического происхождения и минеральными взвесями. Дело в том, что за рассматриваемый период окрашенность воды незначительно, но уменьшилась и соответственно не причастна к фоновому уменьшению прозрачности поверхностных слоев в центральных частях озера.

Та же тенденция отмечена и по данным гидрохимических исследований (Расплетина, 1982): за период 1976-1979 гг. цветность воды в центральных частях озера уменьшилась примерно на 8° по сравнению с началом 60-х годов. Уменьшение окрашенности объясняется тем, что 1959-1962 гг. относились к концу многоводно-началу маловодной фазы, а период исследований 1976-1979 гг. совпал с концом маловодной фазы и соответственно с уменьшением дренирования водосбора. Однако, по данным Т.С. Смирновой (1982), количество коловраток (фильтраторов) в Ладожском озере к 1978 г. (по сравнению с 1959-1962 гг.) увеличилось в 1,5 раза. Это обстоятельство, на которое, как правило, не обращают внимания, возможно, могло сказаться на степени окрашенности озерной воды и вызвать ее уменьшение.

Мутагенные процессы в Ладожском озере по оптическим признакам захватили только поверхностные слои. Водная масса ниже 15-

Т а б л и ц а 1

Изменчивость оптических показателей некоторых озер

Озеро	Годы	$\epsilon$ , $\text{м}^{-1}$	ОП, м	Фитопланктон, тыс. кл./мл	$\rho$ , мг/л
Ладожское	<u>1962-1963</u>				
	<u>1977-1979</u>				
	центральная часть	<u>0.4-0.6</u>	<u>4.0</u>	<u>~200</u>	<u>1.0</u>
		<u>0.8-1.2</u>	<u>3.0</u>	<u>600-800</u>	<u>4.0</u>
Волховская губа		<u>0.5-0.7</u>	<u>1.5</u>	<u>~400</u>	<u>3.0</u>
		<u>1.8-2.0</u>	<u>1.0</u>	<u>1000</u>	<u>8.0</u>
Онежское	<u>1965-1967</u>				
	<u>1977-1979</u>				
	центральная часть	<u>0.25-0.30</u>	<u>6.0</u>	<u>119</u>	<u>1.5</u>
		<u>0.25-0.35</u>	<u>5.0</u>	<u>276</u>	<u>2.5</u>
Повенецкий залив		<u>0.15-0.25</u>	<u>6.5</u>		<u>1.0</u>
		<u>0.25-0.30</u>	<u>5.5</u>	-	<u>2.0</u>
Белое	До 1963	1.0-2.6	1.5	-	15
	1976-1977	0.8-2.0	2.0	200-800	10
Севан	До 1960	0.25	7.3	-	-
	1980	0.30	5.7	-	-
	1981	0.30	4.7	-	-

П р и м е ч а н и е. ОП - относительно прозрачный (по диску). Фитопланктон по данным Н.А. Петровой (1982) и группы авторов (Пырина и др., 1981).

20 м, несмотря на то что содержание биогенных элементов в ней также возросло в 3-4 раза, сохраняет прежние значения  $\epsilon$ , равные 0,3-0,4 м<sup>-1</sup>.

Взвешенные частицы (сестон) в озерных водных массах разнообразны по составу, размерам, происхождению и оптическим параметрам. Вместе с растворенными окрашивающими веществами они оказывают влияние на первичные и вторичные гидрохимические характеристики и определяют прозрачность воды и спектральный состав подводных световых полей и альбедо.

Воздействие сестона на ВГХ и уходящее вверх излучение осуществляется в основном за счет флуктуаций ПГХ и оказывает прямое воздействие на формирование световых полей в озерах, их световой режим и структуру отраженного излучения. Находящиеся в воде растворенные комплексы и взвеси определяют интенсивность процессов поглощения и рассеяния света. Одновременное присутствие в озерных водах сестона, различающегося по генезису, размерам и многим другим физико-химическим показателям, затрудняет отыскание единых зависимостей между ними и ПГХ.

Как правило, в природных водных системах между прозрачностью и взвесями прослеживаются не линейные отношения, а близкие к функции экспоненциального типа. Для этого достаточно сравнить экспериментальные данные и натурные измерения (рис. 1).

В естественных условиях сестон представляет собой различные по размерам, внутренней структуре, внешним формам и происхождению частицы и коллоиды, которые адсорбируются минеральными частицами за счет избыточной поверхностной энергии. Обрастая и приобретая таким образом новые формы и размеры, минеральная частица становится близкой по свойствам мицеллам. Возможно, что сочетание такого ансамбля специфических свойств частиц в природных водах и затрудняет нахождение единой зависимости для всех водных объектов и требует каждый раз индивидуальных решений подобных задач (Румянцев, Чехин, 1984). По всей видимости, это нужно учитывать в случае применения методов дистанционного зондирования водной среды. Наличие в воде сравнительно однородных частиц упрощает задачу (рис. 1, а). Именно по этой причине добавление различного количества минеральной фракции, полученной при высушивании сточных вод ЦБК, в чистую онежскую воду ( $\theta = 0,70$ ) показало надежную зависимость между  $\theta$  и  $\rho$ .

Благодаря сравнительной простоте измерения оптических показателей белым диском (относительной прозрачности - ОП) они до сих пор широко используются в дополнение к другим индикаторам при оценке уровня трофии или выделении роли водных масс в процессе эвтрофирования озерных вод.

Статистический анализ данных по относительной прозрачности ( $Z_E$ ) и физической прозрачности, выраженной через коэффициент пропускания ( $T$ ), позволил получить уравнения регрессии между этими величинами для различных озер. Относительная прозрачность во многом зависит от количества сестона в верхних слоях воды, и, таким образом, уравнения связи показывают зависимость ПГХ

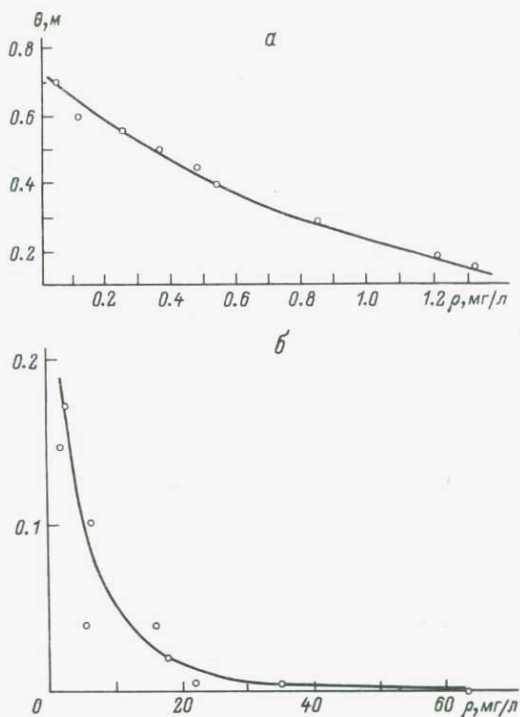


Рис. 1. Зависимость прозрачности от мутности воды.

а - при экспериментальном добавлении взвеси в Онежскую воду ( $\theta=0.7$ ), б - на оз. Кубенском (1972 г.).

от химических и биологических показателей озерных водных масс (табл. 2).

Приведенные уравнения имеют свои доверительные интервалы и ограничения, но в ряде случаев с достаточной степенью надежности могут быть использованы для оценки оптических параметров водных масс по простейшим измерениям величин ОП. Уравнения регрессии позволяют переходить от одних величин к другим, восстанавливать ряды наблюдений и сводить их в одну систему.

Отыскание функциональных связей между ПГХ и взвесями в крупных стратифицированных озерах следует проводить с учетом оптической и биологической структуры озера. Только такая дифференциация водной среды дает наиболее надежные зависимости по сравнению с результатами осреднения данных по взвесям, глубинам, акваториям озера. Наиболее достоверные связи получаются при разделении водной толщи на поверхностную (трофогенный слой) и глубинную зоны, различающиеся между собой по оптическим показателям, уровню первичной продукции и соотношению минеральной и биологической

Т а б л и ц а 2

Зависимость между коэффициентом пропускания ( $T$ ) и относительной прозрачностью ( $Z_B$ ) для ряда озер

Озеро	Уровень регрессии	Коэффициент корреляции	Диапазон применения
Ладожское	$T = 16,97 \cdot Z_B - 3,94$	0,91	$1,0 \leq Z_B \leq 8,0$ м
Онежское	$Z_B = 0,33 + 0,072 \cdot T$	0,93	$1,0 \leq Z_B \leq 8,0$
Белое	$T = 21,1 \cdot Z_B - 13,82$	0,94	$T \geq 10-40\%$ $Z_B \geq 1,0$ м
Севан	$T = 30,8 + 5,5 \cdot Z_B$ или $T = 24,3 \cdot Z_B^{0,55}$	0,75	$2,0 < Z_B < 9,5$ м

фракций во взвесах. Учитывая, что в крупных озерах – Ладожском, Онежском – реально существуют и взаимодействуют несколько водных масс, различающихся по энергетическому состоянию, гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим характеристикам (Румянцев, 1967; Богословский и др., 1972), функциональные связи следует искать отдельно для каждой из них, что существенно усложняет задачу исследования крупных озер контактными и дистанционными методами.

Оптически рассеивающие слои повышенной мутности в крупных озерах, образующиеся в фотической зоне в результате концентрации в них различных видов планктона, располагаются обычно над слоем скачка плотности. Иногда они появляются и под слоем скачка плотности, но обязательно на глубинах с достаточным уровнем освещенности, оптимальным для жизнедеятельности планктона. Отмерший планктон, как правило, локализуется над слоем большей плотности. В озерах с высокой прозрачностью воды, например в Байкале, этот слой формируется на значительных глубинах (Шерстянкин, Каплин, 1973), но не ниже фотической зоны.

В Ладожском и Онежском озерах слой пониженной прозрачности биологического происхождения в фотической зоне довольно часто располагается гораздо выше слоя температурного скачка и реже совпадает с ним. Так, на глубоководной станции на Ладожском озере (южнее о-ва Валаам) в августе 1976 г. слой температурного скачка наблюдался на глубинах от 10 до 25 м. В этом слое температура на глубине 10 м равнялась 13 °С, а на 25 м – 6,7 °С. Слой пониженной прозрачности в пелагиали озера занимал первые 5 м. Частые несовпадения слоев повышенной мутности и температурного скачка на Ладоге и Онеге объясняются тем, что биохимические процессы активно протекают только в условиях достаточной освещенности и при температурах от 10 °С и ниже (Чехин, 1980, 1984; Петрова, 1982). Глубина оптимальной освещенности на Ладоге и Онеге не превышает 10–15 м, а слой температурного скачка

может опускаться гораздо ниже. Однако слой повышенной мутности биологического происхождения может захватить поверхностную зону и опускаться ниже температурного скачка, а в некоторых озерах даже локализоваться в придонных слоях (Румянцев, Дружинин, 1981; Румянцев, 1984).

Мощность поверхностного слоя повышенной мутности может не только варьировать по сезонам, но и зависеть от уровня подводной облученности, интенсивности волнения и связанных с ним вихревых структур типа лэнгмюровских вихрей, внутренних волн, сейшевых колебаний (Румянцев и др., 1984).

Применение буксируемых и зондирующих малоинерционных систем для измерения прозрачности, температуры, электропроводности и других параметров открывает широкие возможности для детального исследования пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей в озерах. Существование широкого спектра флуктуаций оптических показателей определяется разномасштабностью протекающих в озере динамических и химико-биологических процессов. Высокочастотные флуктуации оптических показателей, вызванные внутренними волнами, циркуляциями Лэнгмюра, колебаниями метеорологического происхождения и другими факторами, представляют особый интерес, открывая дополнительные возможности для изучения гидродинамических процессов. Существенным фактором при этом оказывается различие в характере вертикальной стратификации оптических и термодинамических характеристик. Некоторые результаты в изучении перечисленных вопросов получены из наблюдений на озерах Ладожском, Онежском, Белом и Севане (Румянцев, Дружинин, 1981; Румянцев, 1984).

В Ладожском озере концентрация сине-зеленых водорослей может достигать значительных величин, образуя обширные планктонные поля. По данным Н.А. Петровой (1982), локальные вспышки сине-зеленых водорослей в 70-е годы оказались в 40 раз обильнее, чем в 60-е годы, что является безусловным свидетельством быстротекущего процесса антропогенного эвтрофирования озера, и в 1976-1979 гг. достигали 60 тыс. кл/л.

Пространственное распределение суммарных значений  $C_{\text{хл}}$  в августе 1983 г. (рис. 2) показывает, что максимальные величины хлорофилла ( $>5$  мкг/л) отмечаются в районах, испытывающих влияние речных (волховских) и сточных (Приозерского и Питкярантского ЦБК) вод. В центральных частях озера содержание суммарных величин  $C_{\text{хл}}$  не превышало 1.3 мкг/л. В другие месяцы этого года величины  $C_{\text{хл}}$  в центральной части озера (ст. 5.11) не превышали 4.13 мкг/л.

Работы, проведенные по густой сети станций (более 100 по акватории озера), позволили выявить основные элементы пространственной оптической неоднородности Ладожского озера в отдельные гидрологические сезоны.

**Весенняя оптическая структура.**  
Весенний тип пространственного распределения прозрачности воды выглядит следующим образом. Южная мелководная часть озера, вклю-

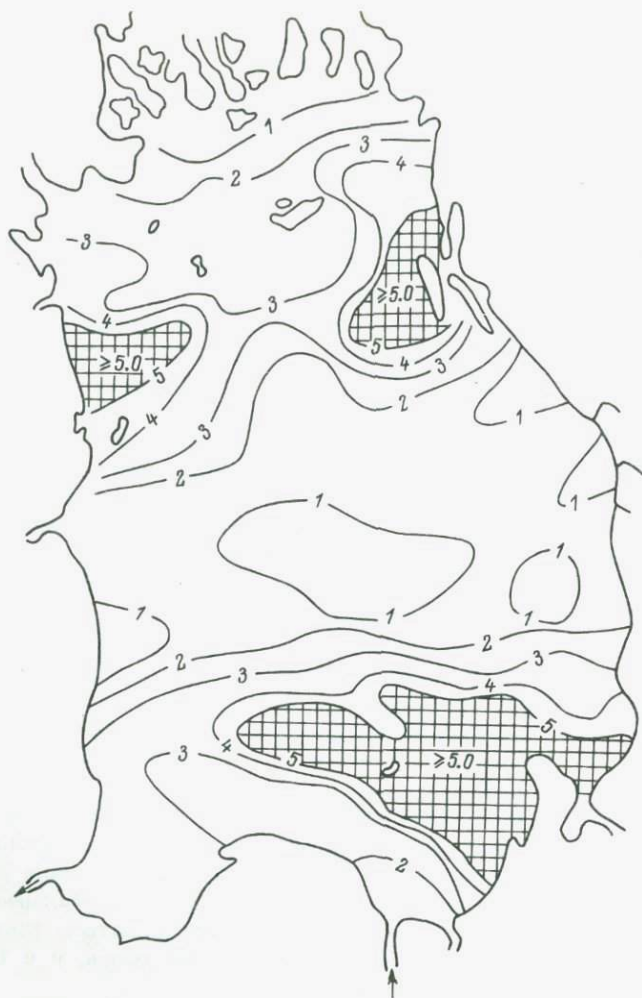


Рис. 2. Распределение хлорофилла по акватории Ладожского озера 21-22 августа 1983 г.

чая Волховскую губу, испытывая влияние рр. Волхова и Сяси, имеет прозрачность ( $T$ ) не более 40-45%. Такие же значения прозрачности и у восточного берегового склона. В июне на продольном разрезе (рис. 3) достаточно четко выделяются срединная часть водного тела с максимальными значениями прозрачности ( $T=60-80\%$ ) и прибрежная зона, включающая Волховскую губу и примыкающую к ней часть озера. В этом районе прозрачность меняется от 70 до 30% на расстоянии 24 км. Оптические градиенты при этом составили около 2% на 1 км. В районе Якимварского залива прозрачность находится в пределах 55-60%.

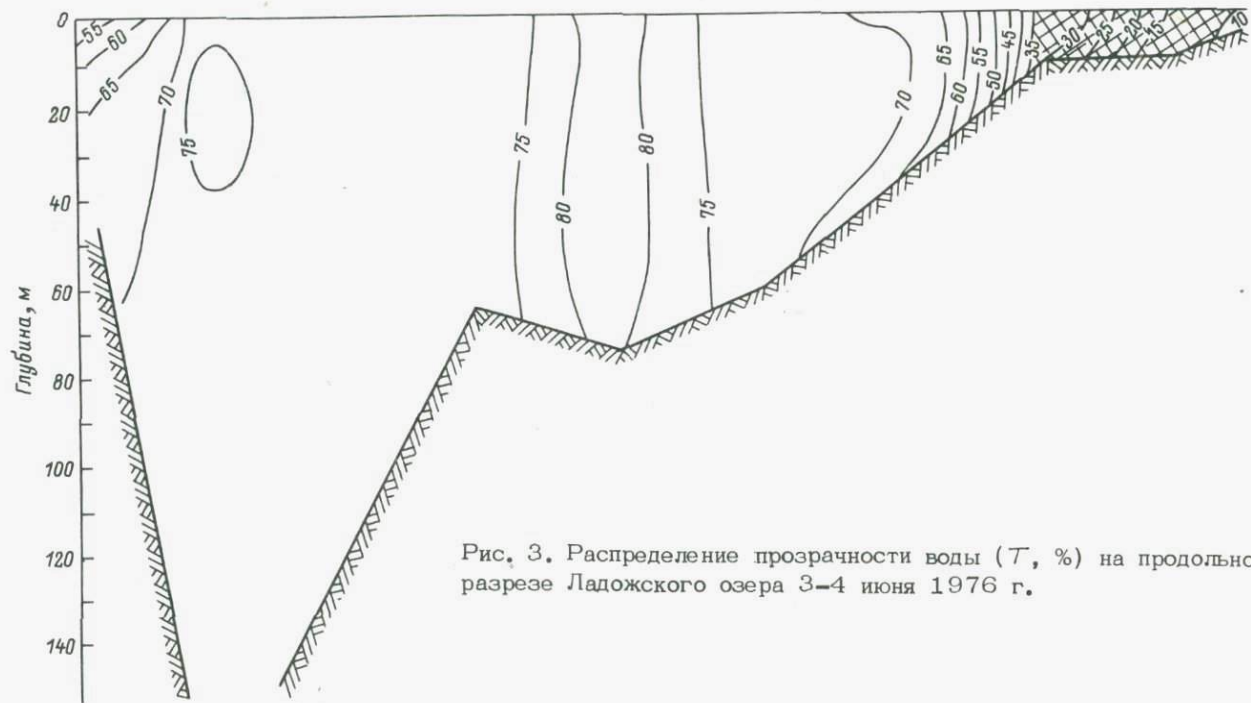


Рис. 3. Распределение прозрачности воды (T, %) на продольном разрезе Ладожского озера 3-4 июня 1976 г.

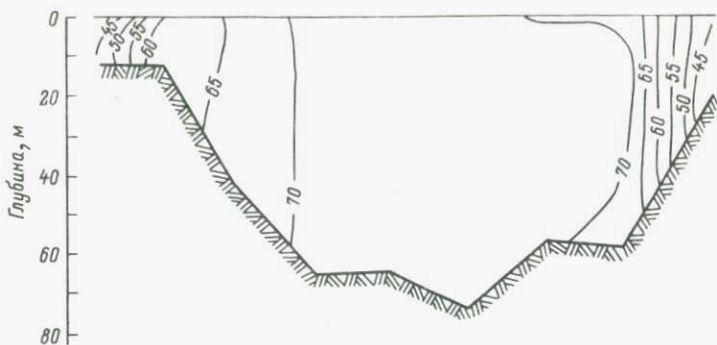


Рис. 4. Распределение прозрачности воды ( $T$ , %) на поперечном разрезе Ладожского озера 7 июня 1976 г.

Для периода весеннего прогревания характерна локализация мутных прибрежно-речных вод в теплоактивной зоне, что нашло отражение на поперечном разрезе (рис. 4). В прибрежных зонах (у восточного и западного берегов) прозрачность изменялась от 60 до 45%.

Приводимые в литературе данные показывают, что глубоководная часть озера в период весеннего прогревания обладает пространственной однородностью по температуре (Тихомиров, 1968), электропроводности (Крючков, 1982) и гидрохимическим показателям (Расплетина, 1982). Эта же характерная черта пелагиали озера была отмечена ранее в работе Б.М. Петрова (1967), а также в более поздних работах (например, Егоров и др., 1982).

Обобщенная схема оптической структуры крупных стратифицированных озер (Ладожского и Онежского), характерная для весеннего периода, представлена на рис. 5, а.

Летняя оптическая структура. Во второй половине июля, в августе и реже в первой половине сентября (Петров, 1967) наиболее прозрачная часть водного тела в пелагиали озера со всех сторон окружена более мутными водами. На поперечном разрезе (рис. 6) видно, что в отличие от весеннего периода прозрачность срединных слоев озера в летний период уменьшилась до 60–65% против 70–80% в весенний. Расположение изофан на рис. 6 позволяет составить следующее представление о распределении прозрачности вод. Область больших глубин, кроме прибрежных районов, заполнена водной массой с прозрачностью от 45 до 50%. Исключением являются поверхностные слои (0–15 м), где величины прозрачности по мере приближения к поверхности уменьшаются до 32–35%. В северной части озера прозрачность уменьшается в направлении к берегу, в Якимварском заливе на поверхности она была равна 18%. С глубиной прозрачность в этом районе увеличивается и достигает 30–37% в придонном слое. Совершенно очевидно, что прибрежные воды являются иными по происхождению,

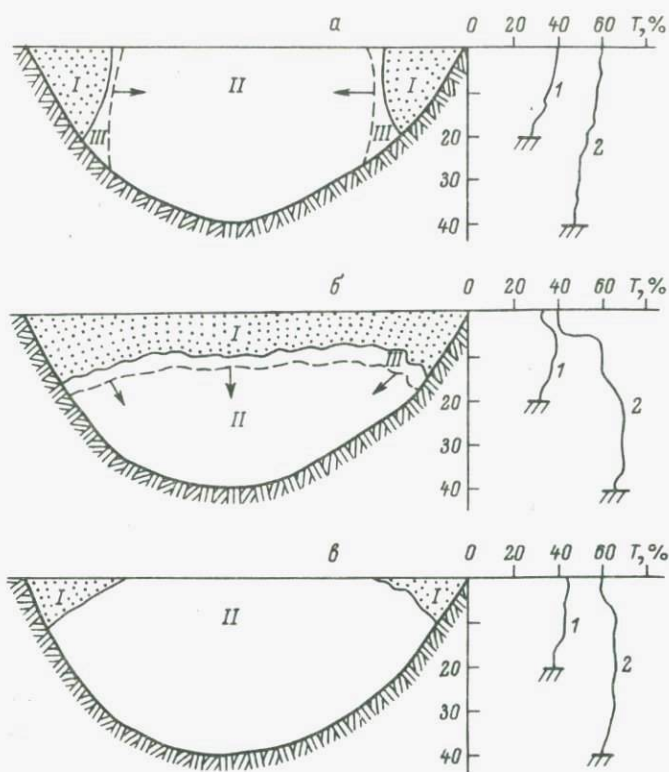


Рис. 5. Обобщенная схема оптической структуры крупных стратифицированных озер.

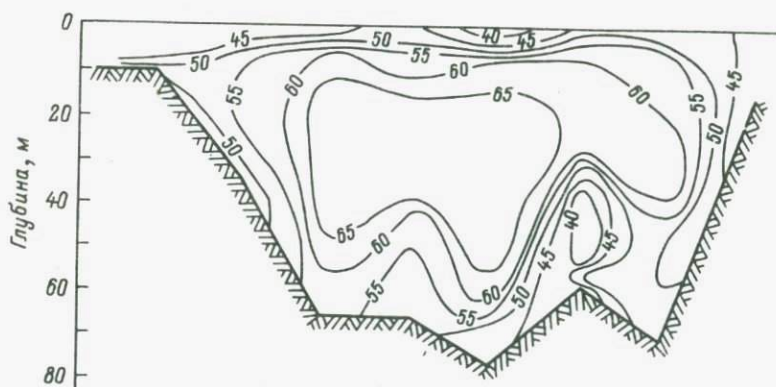
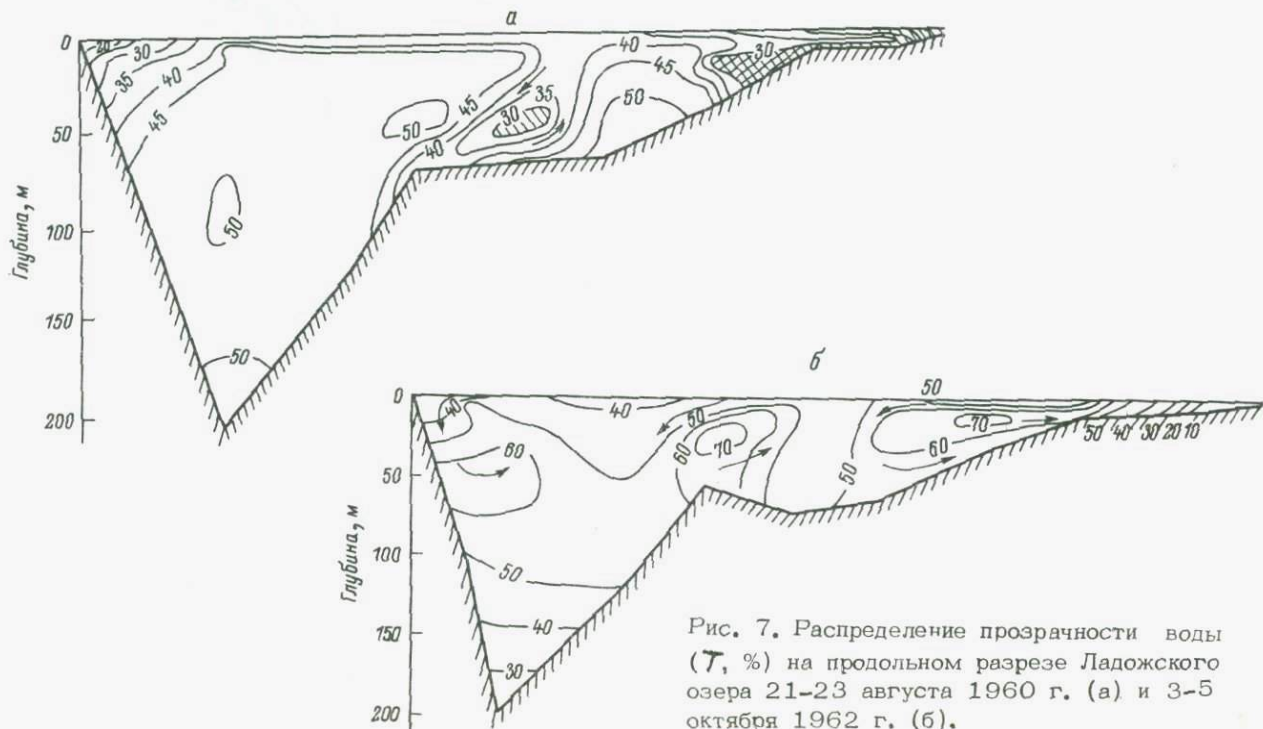


Рис. 6. Распределение прозрачности воды ( $T$ , %) на поперечном разрезе Ладожского озера 15-16 августа 1976 г.



нежели воды глубоководной части озера. Направление ветра в период выполнения работ и в предшествующие 3-4 дня было юго-восточным. Можно с уверенностью полагать, что эти прибрежные воды по происхождению являются поверхностными, пригнанными к северному берегу дрейфовыми течениями, и опускающимися здесь по береговому склону. Южнее этого района под поверхностными водами с меньшей прозрачностью находились воды с прозрачностью 50% (рис. 7). Обнаруживается также область вод с пониженной (< 30%) прозрачностью. Вполне вероятно, что эти воды пришли сюда из Волховской губы и постепенно приобрели тенденцию к заглублиению. Очертания изофан подсказывают реальность такого предположения, тем более, что здесь наблюдается подъем глубинных вод. Вполне можно допустить, что ситуация в этом районе в августе 1960 г. отражала эволюцию крупномасштабного вихря диаметром более 50 км. Модификацию этого же явления в виде двух вихревых образований, процесс их продвижения и распластывания по мере продвижения в южную мелководную область удалось наблюдать также в октябре 1962 г.

В августе оптическая структура эвфотического слоя озера определяется стратификацией планктонных сообществ (как одной из компонент взвеси), что уменьшает его прозрачность. Смыкание прибрежных и озерных поверхностных вод происходит в результате выравнивания температуры по акватории озера в поверхностных слоях и активной ветровой деятельности. Эти же обстоятельства способствуют тому, что прибрежные и озерно-поверхностные воды в августе имеют близкие по величинам значения биопродуктивности, что, естественно, сказывается в понижении прозрачности фотического слоя до 35-40%. В мелководных и прибрежных районах, где отражается влияние глубины, оптические различия между поверхностными и придонными водами (рис. 6) не превышали 10%. В срединных частях озера, где исчезает влияние дна, оптические градиенты в первых 5-8 м наибольшие, на отдельных горизонтах они были равны 2% на метр глубины. Из более ранних исследований на Ладожском озере (Петров, 1967) и Онежском (Румянцев, 1972) также видно, что наибольшие оптические градиенты в пелагиали озер наблюдались обычно в верхнем фотическом слое, составляющем 10-15 м. В этом слое оптические и биологические показатели очень изменчивы, что позволяет назвать его „активным“. На Ладожском озере этот активный слой обычно не превышает 5-8 м и лишь в очень теплые годы достигает 10-12 м и более.

Таким образом, в августе на поперечном разрезе лучше, чем в другие периоды, видно, что водная структура по оптическим показателям довольно четко подразделяется на три зоны: поверхностную, примерно до 10 м, с  $T=40-50\%$ , срединную, от 10 до 50-55 м, с  $T=60-65\%$ , и придонную, от 55 м до дна, с  $T=40-50\%$ . Такая структура в Ладожском озере формируется только в периоды максимальной биологической деятельности в условиях достаточной освещенности и хорошего прогревания поверхностных слоев. В обобщен-

ном виде летняя оптическая структура Ладожского озера приведена на рис. 5, б.

#### Осенняя оптическая структура.

К середине октября пестрота в распределении оптических показателей, свойственная летнему периоду, исчезает. В процессе выхолаживания, в условиях, близких к гомотермии, происходит видовое и количественное обеднение планктона, способствующее повсеместному увеличению прозрачности воды (не исключая и Волховскую губу, где прозрачность достигает 20–30%). Однако в зоне перепада глубин сохраняются наибольшие оптические градиенты, равные 1% на 1 км. В пелагиали озера пространственные изменения прозрачности незначительны – от 60 до 70%. В прибрежных зонах также наблюдается однородное состояние, но при меньших значениях прозрачности.

В обобщенном виде осенняя оптическая структура показана на рис. 5, в.

Волховская губа представляет собой специфический гидрологический район Ладожского озера. Гидрооптические исследования в этой губе и прилегающем к ней районе озера показали, что распространение потока окрашенных и мутных вод в ней может быть представлено в виде четырех вариантов (рис. 8).

1. Волховские и сяские воды, прижимаясь к восточному берегу озера, продвигаются на север за Свирскую губу и, трансформируясь по пути в процессе взаимодействия с озерными водными массами, могут на расстоянии 60–100 км от устья Волхова заглубляться. В этом положении они иногда прослеживались даже в районе продольного разреза Якимварский залив–Волховская губа.

2. Вначале волховские воды распространяются вдоль восточного берега, а затем широким потоком уходят в озеро. Эта ситуация складывается при устойчивых ветрах северных и северо-западных направлений со скоростями более 5 м/с.

3. При действии ветров восточных и северо-восточных направлений поток волховских вод интенсивно подпирается озерными водами. При такой ситуации волховские воды только частично выходят в губу, где прижимаются к самому берегу. Там, где обычно обнаруживаются волховские воды, могут находиться почти озерные воды ( $T = 30\%$ ). Основная часть волховских вод перемещается по обводному каналу, из которого через проходы в дамбе и устья других рек (например, устье р. Сясь) узким потоком выходит в губу и далее в открытое озеро. В связи с этим выявляется новая роль обводного канала как распределителя волховских вод, о чем ранее трудно было предполагать. Возможно также, что значительная часть волховских вод сразу же уходит на глубину и продвигается в открытое озеро в таком состоянии.

4. При действии ветров северных и северо-западных направлений со скоростями более 6–7 м/с волховские воды интенсивно трансформируются внутри губы, заполняют ее южную часть и затем уходят в озеро в западном направлении.

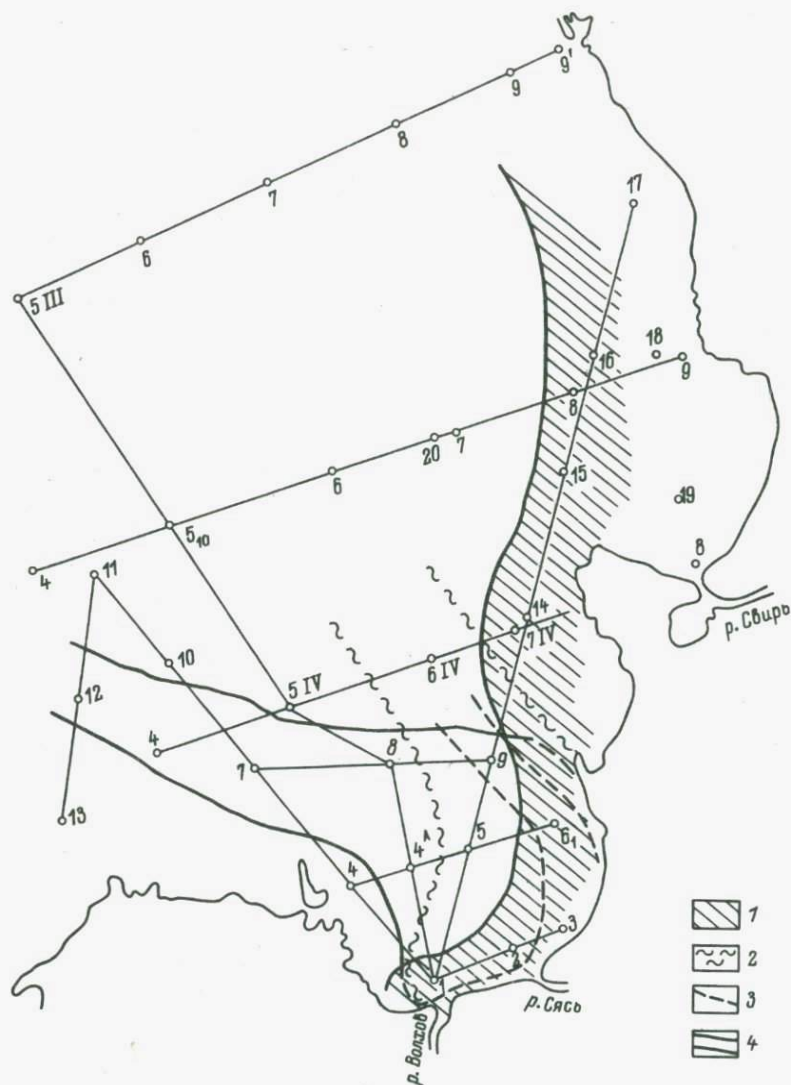


Рис. 8. Схема станций, маршруты буксировки, потоки волховских вод в разные годы.

Эти четыре ситуации характерны для безледного периода. При ледоставе волховские воды постепенно заполняют губу, вытесняя озерные. По этой причине граница весеннего термобара проходит через прибрежно-речную водную массу, что неоднократно наблюдалось в южной части Ладожского озера во время комплексных исследований в весенний период.

## Л и т е р а т у р а

- А лекс андр ова Д.Н., Ка пу ст и на Л.Л. Бакте-  
риопланктон. — В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского  
озера, Л., 1982, с. 156-163.
- Б о г о с л о в с к и й Б.Б., Кириллова В.А., Ф о р ш-  
М ен ш у т к и на Т.Б., Ш е р м а н Э.Э. Опыт выделе-  
ния водных масс Онежского озера. — В кн.: Динамика водных  
масс Онежского озера, Л., 1972, с. 159-203.
- Д р у ж и н и н Г.В., Р у м я н ц е в В.Б. Пространственно-  
временная изменчивость оптических свойств воды Онежского  
озера. — В кн.: Исследование экосистемы Онежского озера: Опе-  
ративно-информационные материалы, Петрозаводск, 1981, с. 30-  
32.
- Е г о р о в Ю.С., Р у м я н ц е в В.Б., Ю д и н Е.А. Оп-  
тические показатели и взвеси в воде Ладожского озера. — В кн.:  
Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера, Л., 1982,  
с. 61-69.
- К р ю ч к о в А.М. Электропроводность воды Ладожского озера. —  
В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера, Л.,  
1982, с. 57-61.
- П е т р о в Б.М. Прозрачность и цвет воды Ладожского озера. —  
В кн.: Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера, Л., 1967,  
с. 156-216.
- П е т р о в а Н.А. Уровень количественного развития и флорис-  
тический состав фитопланктона. — В кн.: Антропогенное эвтрофи-  
рование Ладожского озера, Л., 1982, с. 124-130.
- П е т р о в а Н.А., Р а с п л е т и на Г.Ф. Антропогенное  
эвтрофирование Ладожского озера. — В кн.: Антропогенное эвтро-  
фирование природных вод: Тез. докл. Третьего весоюз. симп. по  
антропогенному эвтрофированию водоемов, Черногловка, 1983,  
с. 166-168.
- П ы р и на И.Л., М и н е е в а Н.М., К о р н е в а Л.Г.,  
Л е т а н с к а я Г.И. Фитопланктон и его продукция. — В кн.:  
Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР,  
Ч. II, Л., 1981, с. 15-64.
- П ы р и на И.Л., Т р и ф о н о в а И.С. Исследование про-  
дуктивности фитопланктона Ладожского озера. — Гидробиол. журн.,  
1979, № 4, с. 26-31.
- Р а с п л е т и на Г.Ф. Режим биогенных элементов в Ладоже-  
ском озере. — В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского  
озера, Л., 1982, с. 79-101.
- Р о с с о л и м о Л.Л. Изменение лимнических экосистем под  
воздействием антропогенного фактора, М., 1977. 144 с.
- Р у м я н ц е в В.Б. О выделении водных масс Онежского озе-  
ра. — В кн.: Предварительные результаты работ комплексной  
экспедиции по исследованию Онежского озера в 1965 г. Петро-  
заводск, 1967, вып. 2, с. 23-25.

- Р у м я н ц е в В.Б. Гидрооптическая характеристика водного тела Онежского озера. - В кн.: Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972, с. 114-158.
- Р у м я н ц е в В.Б. Оптическая структура озера Севан. - В кн.: Оптика моря и атмосферы. Л., 1984, с. 85, 86.
- Р у м я н ц е в В.Б., Д р у ж и н и н Г.В. Пространственно-временная изменчивость оптических свойств воды Онежского озера. - В кн.: Исследования экосистемы Онежского озера. Петрозаводск, 1981, с. 30-32.
- Р у м я н ц е в В.Б., Д р у ж и н и н Г.В., Ч е х и н Л.П. Изменчивость оптических свойств воды крупных озер в современных условиях. - В кн.: Большие озера Северо-Запада СССР. Л., 1984.
- Р у м я н ц е в В.Б., Ч е х и н Л.П. Влияние взвешенных веществ на оптические показатели озерных вод. - В кн.: Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л., 1984, с. 51-55.
- С м и р н о в а Т.С. Изменение структуры сообществ водных беспозвоночных под влиянием антропогенного эвтрофирования. - В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982, с. 173-178.
- Т е р ж е в и к А.Ю., К р ю ч к о в А.М., Г у с а к о в Б.Л., А н т о н о в С.Е. Роль водных масс в процессе эвтрофирования Ладожского озера. - В кн.: Антропогенное эвтрофирование природных вод: Тез. докл. Третьего всесоюз. симп. по антропогенному эвтрофированию водоемов. Черногловка, 1983, с. 168-170.
- Т и х о м и р о в А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера. - В кн.: Тепловой режим Ладожского озера. Л., 1968, с. 144-217.
- Ч е х и н Л.П. О проникновении света в воды Онежского озера. - В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Таллин, 1980, с. 161-164.
- Ч е х и н Л.П. Закономерности изменения проникающего в воду солнечного света в разнотипных озерах. - Автореф. канд. дис. ЛГУ, 1984, 20 с.
- Ш е р с т я н к и н П.П., К а п л и н В.М. Исследование с помощью прозрачномера скоплений *Macrohctopus branickii* Dyb. в оз. Байкал. - Гидробиол. журн., 1973, т. 9, № 1, с. 89-91.
- E d m o n s o n W.T. Nutrients and phytoplankton in Lake Washington. - In: Nutrients and eutrophication: the limited-nutrient controversy. Pros. Symp., 11-12 Febr. 1971. Lawrence, Kansas, 1972, p. 49-56.
- G o l d m a n C.R., A r m s t r o n g R. Primary productivity studies in Lake Tahoe, California. - Verhandl. Interat. Verein. theoret. und angew. Limnol., 1969, Bd 17, Th. 1, S. 28-33.
- H o r i e S. Asian Lakes: Eutrophication, Causes, Consequences, Correctives. Washington, 1969, p. 98-123.

## НЕКОТОРЫЕ СВЕТОВЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Распространение естественного света в озерных водах зависит от физических, химических, биологических и динамических условий в водной толще. Солнце прямо или косвенно является основным источником энергии для всех процессов, происходящих в водоеме. Световые поля, интегральное и спектральное преобразование света в воде влияют прежде всего на биологические и химические процессы, протекающие в водоемах.

Для практики гидрооптика озер представляет интерес тогда, когда появляется возможность количественного или качественного анализа и выявления соотношений между оптическими и биологическими показателями. Важно оценить роль света в ходе биологических процессов, с одной стороны, и влияние различных биологических явлений, объектов и процессов на распространение и преобразование (количественное и спектральное) облученности в водной среде — с другой.

Первичная продукция фитопланктона служит базой всей биологической продуктивности водоема, так как в основном лишь в процессе фотосинтеза фитопланктона происходит образование органических веществ из неорганических. Фотосинтез в планктоне идет при участии световой энергии Солнца (видимая часть суммарной радиации) в поверхностном слое воды, называемом эвфотной зоной ( $Z_3$ ). Существует мнение (Мокиевский и др., 1964; Трифонова, 1976), что эта зона —  $Z_3$  — охватывает слой воды, где подводная облученность превышает 1% поверхностной, этот слой ( $Z_{1\%}$ ) назван фотическим. Замечено (Романенко, 1973; Трифонова, 1976; Dubinsky, Berman, 1976), что большое количество света может оказать угнетающее действие на фитопланктон и вызвать фотоингибирование, что приводит к снижению продукционных процессов в поверхностном слое водоемов (при интенсивном потоке излучения) и смещению максимума фотосинтеза на некоторую глубину. Подводную облученность на этой глубине называют световым оптимумом ( $E_{Z_{\text{опт}}}$ ) первичной продукции. При этом возникает ряд вопросов:

- 1) Совпадает ли эвфотная зона с фотическим слоем?
- 2) Каковы значения облученности на нижней границе эвфотной зоны?
- 3) В каких пределах находится световой оптимум и при каких значениях облученности начинается угнетение фотосинтеза?

Ответы на эти вопросы можно получить на основе анализа доступной информации, опубликованной в литературе, а также материалов, полученных автором совместно с гидробиологами (И.С. Трифоновой, Е.В. Станиславской, А.С. Парпаровым, Т.Н. Кищенко, Л.П. Умновой) при проведении оптических измерений  $E_Z$ ,  $Z_{1\%}$ ,  $Z_B$ ,  $t$  и цветности (табл. 1). Ряд величин в табл. 1 — облучен-

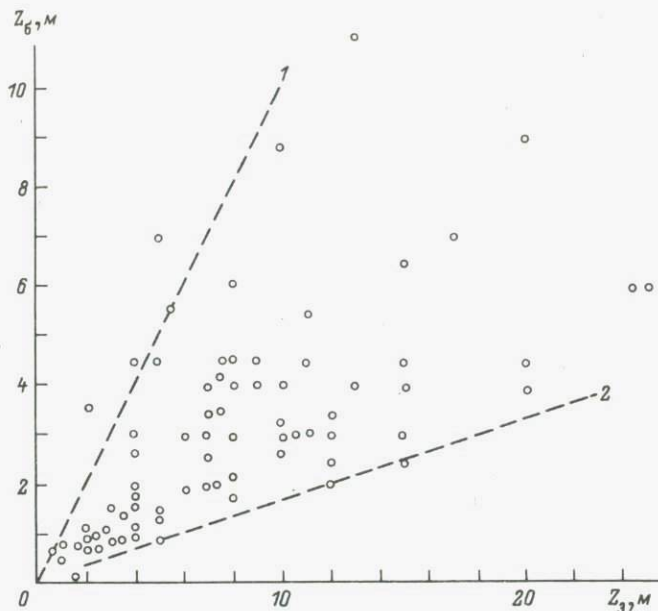


Рис. 1. Соотношение между прозрачностью ( $Z_B$ ) и глубиной эвфотной зоны ( $Z_3$ ).

$$1 - Z_3 = Z_B; \quad 2 - Z_3 = 6 \cdot Z_B.$$

ность в % подповерхностной облученности ( $E_0 - E_{Z_3}$ ) на нижней границе эвфотной зоны и глубина 1%-ной облученности —  $Z_{1\%}$  — оценен (при их отсутствии) по соотношениям, полученным автором (Чехин, 1984).

Глубина видимости белого диска ( $Z_B$ ) — недостаточно надежная мера для определения эвфотной зоны ( $Z_3$ ), так как, судя по данным различных авторов (рис. 1), для разнотипных вод отношение  $Z_3$  к  $Z_B$  варьирует в пределах 1–6. Такой относительно большой диапазон  $Z_3/Z_B$  может быть объяснен различным влиянием первоначальных факторов, обуславливающих  $Z_3$  и  $Z_B$ . Прозрачность кроме показателей пропускания света зависит и от обратного светорассеяния и засветки глаза, а эвфотная — продуктивная — зона кроме света зависит от температуры воды, биогенов и других необходимых для фотосинтеза условий.

Глубина эвфотной зоны (рис. 2) занимает от 2.4 до 0.8 глубин фотического слоя в различных водах со средним положением  $Z_3 = 1.5 Z_{1\%}$ . Причина различий вновь кроется в разнице первичных факторов, обуславливающих  $Z_3$  (свет, температура, биогены и др.) и  $Z_{1\%}$  (рассеяние, многократное рассеяние, поглощение). Нижний предел эвфотной зоны (табл. 1) располагается на глубине, где подводная облученность составляет от 10 до 0.03% подповерхностной.

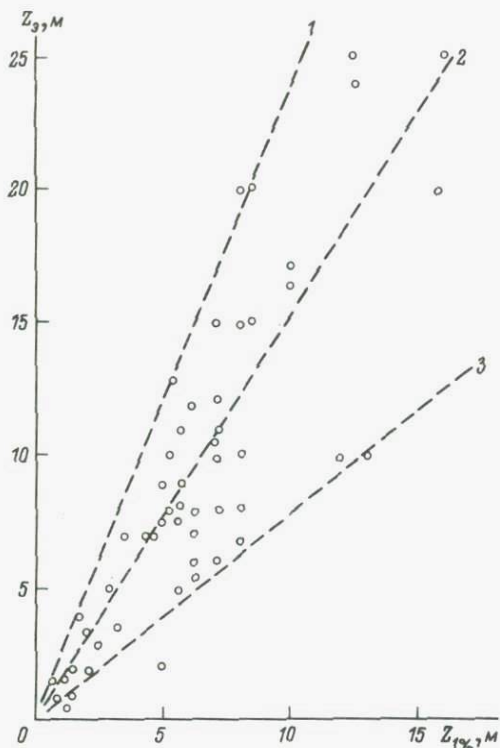


Рис. 2. Связь между глубиной эвфотной зоны ( $Z_{\text{э}}$ ) и фотическим слоем ( $Z_{1\%}$ ).

1 -  $Z_{\text{э}} = 2.4 \cdot Z_{1\%}$ ; 2 -  $Z_{\text{э}} = 1.5 \cdot Z_{1\%}$ ; 3 -  $Z_{\text{э}} = 0.8 \cdot Z_{1\%}$ .

Таким образом, при благоприятных условиях фитопланктон может синтезировать органическое вещество при очень малых количествах поступающей энергии (до 0,03%  $E_{-0}$ ). Поэтому оценивать эвфотную зону (трофогенный слой) по проникновению света, а тем более по прозрачности воды очень сложно, так как в течение периода вегетирования сменяется видовой состав планктона (по-разному относящийся к свету), меняются температура, биогены и другие факторы.

Кроме светового оптимума существует целый набор оптимальных условий, обеспечивающих максимальную скорость фотосинтеза (Хит, 1972). В данном случае представляется возможным оценить одновременное влияние облученности и температуры воды. Как указывает Хит, температура воды влияет на скорость обычных химических реакций, которые имеют место при продуцировании и называются темновыми. Скорость реакций увеличивается в 2-3 раза при каждом повышении температуры на  $10^{\circ}$ . Воздействие двух факторов (рис. 3) - облученности ( $E$ ) и температуры ( $t$ ) - на фитопланктон при фо-

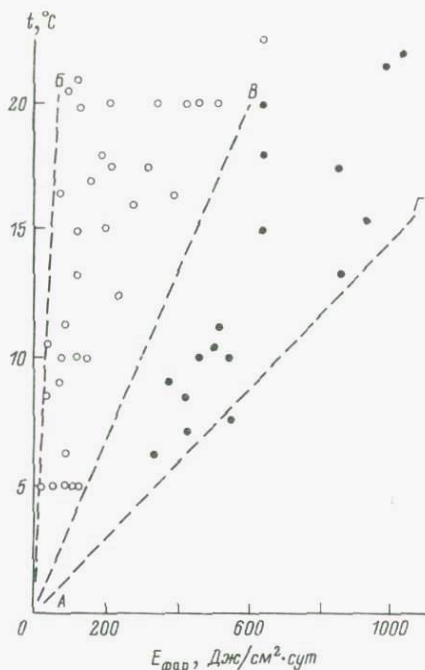


Рис. 3. Взаимодействие фотосинтетически активной радиации ( $E_{\text{фap}}$ ) и температуры воды ( $t^{\circ}$ ) на глубинах с максимальной продукцией (область  $AB-AB$ ) и в слое светового насыщения фитопланктона (область  $AB-AG$ ).

тосинтезе показывает, что каждой температуре воды соответствует свой уровень (предел) освещенности, при котором, во-первых, наблюдается оптимум фотосинтеза (область между прямыми  $AB$  и  $AB$ ), во-вторых, предел, где световое насыщение фитопланктона уже наступило, но угнетения еще не наблюдается (область между прямыми  $AB$  и  $AG$ ), и, в-третьих, лишь за пределами этой области (ниже линии  $AG$ ) происходит угнетение процессов. Таким образом, фотоингибирование зависит от температуры при различной освещенности. Например, при  $t=5^{\circ}$  угнетение фотосинтеза происходит при  $E > 300$  Дж/см<sup>2</sup>·сут, а при температуре  $20^{\circ}$  — лишь при  $E > 1.2$  кДж/см<sup>2</sup>·сут. Нижняя граница, при которой наблюдается световой оптимум продукционных процессов (линия  $AB$ ), располагается в районе 40–60 Дж/см<sup>2</sup>·сут, что подтверждает возможность фотосинтеза на глубинах с достаточно малой облученностью, если остальные условия оптимальны. Конечно, эти границы ( $AB$ ,  $AB$ ,  $AG$ ) пока еще достаточно условны из-за малого количества фактического материала. Однако даже на основании анализа этих данных можно полагать, что угнетение фотосинтеза фитопланктона зависит как от светового, так

Таблица 1

Фотические и биологические параметры различных водоемов

Водоем	$Z_3$	$E_{Z_3}$	$Z_B$	$Z_{1\%}$	$E_{\text{опт}}$	$t, ^\circ\text{C}$	Источник	Примечание
Белорусские озера	1-13	3,5-1,6	0,8-1,2	1,4-14	-	-	Мокиевский и др. (1964)	Цветность воды 15-87°
Озеро Дотка	1,5	0,01	0,3	0,6	-	-	Романенко, Даукшта (1969)	Июль, 1967 г.
Рыбинское в/х	1	0,65	0,5	0,9	-	-		Сентябрь, 1967 г.
	3	0,3	1,5	2,4	-	-		Район Ольхово, 1965 г.
	0,3	15,3	0,7	1,2	-	-		Устье Себлы, 1965 г.
	2	1	1,2	2	-	-		То же, 1967 г.
	1,7	0,2	0,7	1,2	-	-	Центральная часть, 1967 г.	
	2-3,5	0,12-0,08	0,8-1,4	1,4-2	126-314	-	Романенко (1973)	10 измерений
Озеро Дривяты	4-7	0,002-0,06	1-3	1,7-4,3	126-314	-	Ковалевская (1970)	
Озеро Красное	5-7	0,05-0,01	1,4-2	3-3,5	100-452	-	Трифенова (1976)	Весна-лето
Озеро Байкал	-	-	-	-	21-63	-	Бондаренко (1981)	Март, июль
					209-628	-		Май, июль, август
Озеро Киннерет	16,5	0,03	-	10	-	-	Dubinsky, Berman (1976)	
Онежское озеро	7-9	0,1-0,025	3,5-4	4,7-5	-	-	Сорокин, Федоров (1969)	Различные районы озера
	6-7	-	-	-	419	-	Пырина и др. (1969)	

Куйбышевское в/х	9	0,07	4,5	5,7	42	9	Умнова (1982); Чехин, Умнова (1982) и данные автора	23 06 78	
	10	0,02	4	5,4	126	15		10 07 78	
	5,5	1,6	5,5	6,1	234	12		25 07 78	
	5	1,7	4,5	5,7	42	10		15 08 78	
	13	0,002	4	5,4	92	12		23 08 78	
	11	0,014	4,5	5,7	75	12		4 09 78	
	7,5	0,12	3,5	5,1	126	14		5 07 79	
	8	0,15	4,5	5,7	314	18		14 07 79	
	7,5	0,2	4,2	5,5	218	17		4 08 79	
	8	0,11	4	5,4	188	18		20 08 79	
	8	0,15	4,7	5,7	126	10		Чехин, Умнова (1982)	5 09 79
	2	16,5	3,5	5,1	84	6			11 09 79
	2,2	2,8	1	2,8	1000	24		Данные автора при участии Т.Н. Кищенко	Ст. 13
2	4,5	0,7	2,3	963	23	Ст. 45			
3,5	1,7	0,9	3,2	628	25	Ст. 21			
Озеро Севан	10	2,7	2,6	13	389	17	Данные автора с использованием материалов А.С. Парпарова		
	6-25	4-0,06	2-9	8,6-16	-	-	Данные А.С. Парпарова, предоставленные автору	29 измерений в различные сезоны	

Примечания.  $Z_3$  - глубина эвфотной зоны, м;  $E_{Z_3}$  - облученность на нижней границе  $Z_3$ , %  $E_0$ ;  $Z_B$  - прозрачность, м;  $Z_{1\%}$  - глубина фотического слоя, м;  $E_{\text{опт}}$  - облученность на глубине максимального фотосинтеза, Дж/см<sup>2</sup>-сут.

и от термического режимов. Вероятно, различные виды фитопланктона, как это показано И.Л. Пыриной (1961), имеют отличающиеся границы оптимума насыщения и угнетения. Таким образом, представляется более целесообразным введение понятия „фототермоингибирование“. Подтверждением такого вывода служат данные, полученные на Байкале (Бондаренко и др., 1981): весной максимум фотосинтеза наблюдался при 20–60 Дж/см<sup>2</sup>·день, а летом – при 200–600 Дж/см<sup>2</sup>·день. Примерно такие же значения  $E$  получены И.С. Трифионовой (1976) на оз. Красном. В своем литературном обзоре Харрис (Harris, 1978) также пишет, что световой оптимум зависит от температуры и летом выше, чем зимой.

В процессе фотосинтеза используется лишь часть энергии, поступающей на поверхность водоема и проникающей на различные глубины. Измерения (табл. 2) показывают, что процент утилизации энергии водорослями изменяется в очень широких пределах – от 0,0004 до 5,2, или на 4 порядка. Минимальная утилизация наблюдается на малопродуктивных водоемах ранней весной и поздней осенью. Максимум утилизации приходится на август–сентябрь, на периоды летне-осенних пиков продуктивности, когда приходящая на водоем энергия уже снижается, а продукционная способность фитопланктона максимальна или близка к ней за период открытой воды.

В то же время сами биологические объекты (планктон, детрит и т.п.) прямо или косвенно влияют на гидрооптические показатели вод через изменение их первичных оптических характеристик: показателя поглощения, рассеяния, ослабления и индикатрису рассеяния. Например, в водах, насыщенных карбонатами кальция, увеличение численности планктона приводит (кроме прямого изменения первичных оптических характеристик) к усилению процессов выпадения в осадок карбонатов, что в свою очередь влияет на те же оптические характеристики и более значительно. Изменение среднегодовых значений суточной первичной продукции под 1 м<sup>2</sup> ( $\sum A_{\text{ср, год}}$ , г С/м<sup>2</sup>·сут), по данным А.С. Парпарова, и значений прозрачности воды ( $Z_G$ , м), по данным ГГИ, на оз. Севан (рис. 4) свидетельствует о взаимовлиянии этих двух величин. Вероятнее всего до 1976 г. увеличение продукции обуславливало снижение прозрачности воды (тем более, что в этот период  $\sum A$  была максимальной), с 1976 г. уже малая прозрачность воды и снижение подводной облученности лимитировали рост продуктивности планктона. Конечно, здесь сказывалось взаимовлияние многих факторов, но теоретически такая связь между прозрачностью и продуктивностью вполне возможна.

Общеизвестно (Гамбарян, 1968; Ковалевская, 1970; Покровская, 1981), что произрастание макрофитов зависит от многих факторов: динамики, изменения уровня воды, температуры, света, донных отложений, питательных веществ. Макрофиты являются основным продуцентом органического вещества в водоемах и тем регулируют оборачиваемость биогенных элементов (Покровская, 1981). Потребляя биогены и задерживая их на длительный срок в своих тканях, макрофиты снижают продукцию фитопланктона и тем самым препятствуют всплескам „цветения“ водоемов в летнее время. Например, на

Т а б л и ц а 2

Утилизация солнечной энергии фитопланктоном в различных водоемах

Водоем	Утилизация, % $E_{\text{фр}}$	Источники	Примечание
Иваньковское в/х	0,2-0,8	} Пырина (1961)	Преобладают диатомовые водоросли Преобладают сине-зеленые водоросли Сине-зеленые водоросли малой продуктивности
Куйбышевское в/х	0,05-0,4		
Рыбинское в/х	0,03-0,3		
Озеро Белое	0,34-1,54	} Рутковская (1961)	Для слоя 0-1 м Для слоя 0-2 м На поверхности
Озеро Кубенское	0,4-5,2		
Река Ковжа	0,028		
Озеро Нарочь	0,2-0,48	} Мокиевский и др. (1964)	Шв.=15°; Z <sub>с</sub> =10-12 м Шв.=87°; Z <sub>с</sub> =3 м Шв.=45°; Z <sub>с</sub> =0,8 м Шв.=27-45°; Z <sub>с</sub> =1,9-7 м
Озеро Сесито	0,66		
Озеро Баторино	0,36-0,67		
Различные озера Белоруссии	0,35-0,83		
Озеро Севан	0,009		
Озеро Дривяты	0,22	} Гамбарян (1968)	Исследования 1958-1959 гг. Среднее за июнь
	0,46		
	1,00	} Ковалевская (1970)	Среднее за июль Среднее за август Начало сентября
	1,16		
Южный Байкал	0,0004-0,42		
Южный Байкал	0,025	} Мешерякова (1975)	Максимум в августе Минимум в ноябре; средние значения
Озеро Красное	0,24-1,4		
Озера Большеземельской тундры	0,06-0,6	} Трифонова (1976)	Максимум в октябре Июль-август 1968 г.
Озеро Киннерет (Израиль)	0,35		
Эфиопские высокопродуктивные озера	0,51-3,34	} Dubinsky, Berman (1976)	Июль 1973 г.
Братское в/х	0,004-0,56		
Онежское озеро	0,013-0,096	} Паутова, Кращук (1981)	1978 г., среднее 0,036 1979 г., среднее 0,067
	0,026-0,11		
Куйбышевское в/х	0,14-0,56	} Чехин, Уминова (1982)	Июль 1982 г.
		Данные автора с использованием материалов Т.П. Кищенко	

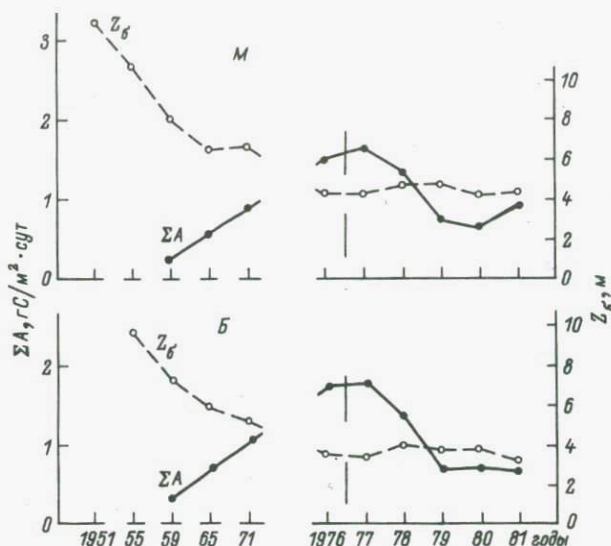


Рис. 4. Взаимовлияние первичной продукции ( $\Sigma A_{\text{ср.год}}$ , гС/м<sup>2</sup>·сут) и прозрачности воды ( $Z_{\delta}$ ; ср.год, м) на Малом (М) и Большом (Б) Севане за некоторые годы.

оз. Севан до снижения его уровня прозрачность воды в зависимости от времени года изменялась от 5,8 до 19 м, в первые годы после снижения уровня — от 3 до 14 м, а после 1976 г. до настоящего времени — от 2 до 8 м, т.е. уменьшилась более чем в два раза по сравнению с ее первоначальными величинами. В предпусковой период в озере обильно развивалась высшая водная растительность, распространявшаяся до значительных глубин (30 м). В настоящее время биомасса макрофитов снизилась в 35 раз, но возросла почти в 20 раз биомасса фитопланктона. Согласно В.М. Катанской (1979), погруженные, полупогруженные и надводные формации макрофитов увеличивают максимальную глубину своего существования при возрастании прозрачности воды. Обработка данных В.М. Катанской для водохранилищ — охладителей тепловых электростанций с использованием формул, полученных автором (Чехин, 1984), позволила перейти от прозрачности и цветности воды к величинам подводной облученности и оценить  $E_Z$  в процентах  $E_0$  на максимальных глубинах произрастания различных формаций растений. Такой пересчет показал, что максимальная глубина произрастания погруженных макрофитов приходится на участки дна, которых достигает 0,1–0,3% подповерхностной облученности в полдень, или в среднем для всей формации — 1–2%. Для полупогруженных растений с плавающими листьями минимум составляет 2–4% со средним  $E_Z = 3,5–5,5\%$ . Для надводных растений эти величины соответственно равны 1,5–4,5 и 5–8% под-

поверхностного облучения. Таким образом, в первом приближении можно полагать известными пределы потоков света, необходимых для произрастания различных формаций макрофитов.

Анализ литературных данных и материалы, полученные автором, позволяют оценить влияние светового фактора на ход биологических процессов в водоемах и свидетельствуют о необходимости его учета при экологических исследованиях и прогнозных оценках.

### Л и т е р а т у р а

- Б ондаренко Н.А., Гусельникова Н.Е., Перова Т.С., Покатилова Т.Н. Световые оптимумы для фотосинтеза фитопланктона в Байкале. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в водоемах: Тез. докл. У Лимнол. совещ. Иркутск, 1981, вып. 1, с. 44, 45.
- Г амбарян М.Е. Микробиологические исследования озера Севан. Ереван, 1968. 166 с.
- К атанская В.М. Растительность водохранилищ—охлаждающей тепловых электростанций Советского Союза. Л., 1979. 278 с.
- К овалевская Р.З. Первичная продукция оз. Дривяты. — В кн.: Биологическая продуктивность эвтрофного озера. М., 1970, с. 14—31.
- Мещерякова А.И. Первичная продукция Байкала. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, 1975, с. 20—27.
- М окиевский К.А., Ковалевская Р.З., Михеева Т.М. Распространение солнечной радиации в водной толще озер и эффективность ее утилизации планктоном. — В кн.: Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики. Минск, 1964, с. 80—87.
- П аутова В.Н., Крашук Л.С. Первичная продукция и ассимиляционная активность фитопланктона в Братском водохранилище. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в водоемах. Иркутск, 1981, с. 106—108.
- П окровская Т.Н. О нарушении продукционной организации эвтрофирующих макрофитных озер. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в водоемах. Иркутск, 1981, с. 111—113.
- П ырина И.Л. Зависимость первичной продукции от состава фитопланктона. — В кн.: Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск, 1961, с. 308—313.
- П ырина И.Л. Фотосинтез пресноводного фитопланктона при различных световых условиях в водоемах. — В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. М., 1967, с. 202—210.
- П ырина И.Л., Гецен М.В., Вайнштейн М.Б. Первичная продукция фитопланктона озер Харьейской системы Большеземельской тундры. — В кн.: Продуктивность озер восточной части Большеземельской тундры. Л., 1976, с. 63—76.

- Пырина И.Л., Елизарова В.А., Николаев И.И. Содержание фотосинтетических пигментов в фитопланктоне Онежского озера и их значение для оценки уровня продуктивности этого водоема. - В кн.: Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973, с. 95-103.
- Романенко В.И. Связь между интенсивностью фотосинтеза при равномерном распределении водорослей в толще воды и прозрачностью по диску Секки. - Информ. бюл. ИБВВ, 1973, № 19, с. 11-15.
- Романенко В.И., Даукшта А.С. Влияние света на интенсивность фотосинтеза фитопланктона в поверхностных слоях воды. - Информ. бюл. ИБВВ, 1969, № 3, с. 10-12.
- Рутковская В.А. Предварительные итоги исследования проникновения солнечной радиации в водную толщу водохранилищ и озер. - В кн.: Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск, 1961, с. 289-300.
- Сорокин Ю.И., Федоров В.К. Первичная продукция и деструкция в Онежском озере. - В кн.: Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск, 1969, вып. 3, с. 29-33.
- Трифонова И.С. Фитопланктон и его продукция. - В кн.: Биологическая продуктивность озера Красного. Л., 1976, с. 69-104.
- Умнова Л.П. Первичная продукция фитопланктона, содержание хлорофилла „а“ и сестона в воде залива Большое Онего Онежского озера. - В кн.: Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982, с. 81-93.
- Финенко З.З. Действие света на фотосинтез фитопланктона в море. - В кн.: Основы биологической продуктивности Черного моря. Киев, 1979, с. 93-95.
- Хит О. Фотосинтез. М., 1972. 315 с.
- Чехин Л.П. Закономерности изменения проникающего в воду солнечного света в разнотипных озерах: Автореф. канд. дис. Л., ЛГУ, 1984, 20 с.
- Чехин Л.П., Умнова Л.П. Утилизация солнечной энергии фитопланктоном. - В кн.: Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л., 1982, с. 93-97.
- Шемшур В.Е., Урденко В.А., Федирко В.И. О связи относительной прозрачности с содержанием хлорофилла „а“ в воде. - Океанология, 1982, т. 22, № 3, с. 404-407.
- Dubinsky Z., Verman T. Light utilization efficiencies of phytoplankton in Lake Kinneret (Sea of Gallilee). - Limnol. Oceanogr., 1976, N 21, p. 226-230.
- Harris G.P. Photosynthesis, productivity and growth: The physiological ecology of phytoplankton. - *Ergebn. der Limnol.* 1978, Bd 10, N. 10, 171 p.
- Riley G.A. Oceanography of Long Island Sound, 1952-1954. II. Physical Oceanography. - *Bul. Birgham. Oceanogr. Coll.*, 1956, N 15, p. 15-46.

## ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВОД ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Активное внедрение в практику лимнологических исследований методов дистанционного (пассивного и активного) зондирования озер требует оперативного определения состава, дисперсности, оптических характеристик взвешенных частиц и окрашивающих комплексов, а также степени их влияния на оптические поля и коэффициент спектральной яркости.

Особенности оптической структуры Ладожского озера определяются количественным и качественным соотношением активных компонентов — растворенных веществ и взвешенных частиц различного генезиса.

Многолетние исследования показали, что в изменении оптической структуры Ладожского озера, представленной несколькими водными массами, доминирующая роль принадлежит растворенным окрашивающим веществам. Цветовые характеристики — как наиболее консервативные оптические индикаторы — позволяют определить границы водных масс, выделить потоки речных и сточных вод внутри Ладожского озера. Внутри каждой водной массы, особенно в центральных частях озера, где цветовые характеристики практически не изменяются не только от места к месту, но и по глубинам, наблюдаются разномасштабные флуктуации оптических свойств воды и световых полей трофогенного слоя, вызванные присутствием и пространственно-временной вариацией взвесей различного происхождения (под влиянием внутренних волн, циркуляций Лэнгмюра, ветровых волн, сейсмических колебаний, апвеллингов и суточных миграций планктонных организмов, их сезонной изменчивости и т.д.).

В значительной степени состав взвесей, их распределение и динамика в крупных озерах определенным образом связаны с батиметрией водоема. Переход от мутных прибрежно-речных вод к прозрачным водам открытых частей озера может происходить очень резко, что позволяет назвать эту границу „прибрежным гидрологическим фронтом“. Взвешенные частицы по генетическому признаку подразделяются на две группы — минеральные и биологические. Биологическая взвесь представлена всем разнообразием планктонного сообщества — фитопланктоном, зоопланктоном, бактериопланктоном, а также пылевой растений и деревьев. В Ладожском озере преобладают частицы размером более  $9\mu$  (табл. 1). По составу взвесей и соотношению между минеральной и биологической компонентами открывается принципиальная возможность установления происхождения и „возраста“ водных масс и даже отдельных струй в озере в определенный период жизни водоема.

По концентрации взвесей во все периоды жизни озера на продольном разрезе выделяются три зоны. Южная мелководная зона с глубинами до 10 м имеет наибольшую концентрацию взвесей. Основная озерная водная масса озера, расположенная между о-вом

Т а б л и ц а 1

Концентрация и размерность взвесей в воде Ладожского озера

Компоненты	Концентрация, г/м <sup>3</sup>		Размеры, $\mu$		Примечание
	мин.	макс.	мин.	макс.	
Общее количество взвесей, мг/л	0,4	11,6	-	< 9	Определено как потери при прокаливании
минеральная составляющая	0,2	3,2	-	< 9	
органическая составляющая	0,2	8,4		< 9	
Хлорофилл ( $\Sigma$ ), мкг·л <sup>-1</sup>	0	103			Определен спектрометрическим методом
"а"	0	103			
"б"	0	10			
"с"	0	2			
Фитопланктон, тыс. кл.·л <sup>-1</sup>	0,1	60000	1	2000	
Зоопланктон, экз.·л <sup>-1</sup>	0,1	50000	50	2500	
Бактериопланктон, тыс. кл.·мл <sup>-1</sup>	140	3500	0,035	375	

Примечание. Таблица составлена сотрудниками Ладожской экспедиции Института озераедения АН СССР.

Сухо и северными шхерами, обладает наименьшей мутностью. В особый район выделены северные шхеры. В частности, в Якимварском заливе всегда повышенная мутность воды.

В весенний период (март-июнь) южную часть озера занимают разбавленные волховские воды с содержанием взвесей по всей глубине от 6 до 8 г/м<sup>3</sup>. Севернее о-ва Сухо глубина увеличивается и концентрация взвесей падает до 0,6-0,7 г/м<sup>3</sup>. В средней части озера количество взвесей уменьшается до минимальных значений, образуя как бы ядро вод с мутностью всего 0,4-0,6 г/м<sup>3</sup>. В глубоководной части озера (севернее о-ва Валаам) содержание взвесей увеличивается до 0,6 на поверхности и до 0,8 г/м<sup>3</sup> у дна. В Якимварском заливе весной мутность воды в поверхностных слоях обычно колеблется около 2 г/м<sup>3</sup>.

В летний период (июнь-сентябрь) в южной части озера количество взвесей остается близким по значениям к весеннему периоду. Во всей остальной части озера, за исключением Якимварского залива, содержание взвесей увеличивается, причем наибольшее их количество - в пределах 1,6-1,9 г/м<sup>3</sup> - наблюдается в верхнем 10-

15-метровом фотическом слое. Ниже этого слоя, где прозрачность воды увеличивается до  $0.4-0.5 \text{ м}^{-1}$  (против  $1.0-1.2 \text{ м}^{-1}$  в поверхностных слоях), концентрация взвесей соответственно уменьшается до  $1.1-1.4 \text{ г/м}^3$ , а у дна - до  $0.8-0.9 \text{ г/м}^3$ . В верхнем слое Якимварского залива мутность воды составляет  $2.1-2.9 \text{ г/м}^3$ , а ко дну уменьшается до  $1.6 \text{ г/м}^3$ .

Повышение количества взвесей в летний период в поверхностном слое объясняется увеличением численности фито- и зоопланктона. Это подтверждается данными по содержанию органической составляющей взвесей (потери при прокаливании). В поверхностном слое органическая составляющая взвесей находится в пределах  $60-80\%$ , а на глубинах она снижается до  $20-40\%$ .

За последние 15-20 лет (как следствие антропогенного эвтрофирования) численность весеннего фитопланктона (соответственно и биомасса) в целом по озеру возросла в 4 раза, а летнего - в 6 раз (Петрова, 1982). Локальные вспышки как весеннего, так и летнего планктона в 70-е годы оказались в 40 раз выше, чем в 60-е годы. Стали преобладать диатомовые, сине-зеленые и зеленые водоросли. Возросли темпы роста численности фитопланктона. Так, например, в период с 1960 по 1962 г. в южной части Ладожского озера рост численности весеннего фитопланктона от года к году составлял  $3.5 \text{ тыс. кл.л}^{-1}$ , летнего -  $1.1 \text{ тыс. кл.л}^{-1}$ . В период с 1962 по 1979 г. темпы роста весеннего фитопланктона уже составляли  $116.3 \text{ тыс. кл.л}^{-1}$ , а летнего -  $41.3 \text{ тыс. кл.л}^{-1}$ .

В осенний период (октябрь-ноябрь) общее количество взвесей в поверхностных слоях уменьшается по всему озеру: в срединных частях до  $0.9-1.2 \text{ г/м}^3$ , в Волховской губе мутность составляет  $3-4 \text{ г/м}^3$ , а в Якимварском заливе -  $1.1-1.3 \text{ г/м}^3$ . На глубинах более  $10-15 \text{ м}$  мутность, как правило, в этот период не превышает  $0.6-0.7 \text{ г/м}^3$ . Органическая составляющая в осенний период в верхнем слое вод не превышает  $50\%$  по всему озеру, на глубинах она составляет около  $40\%$  общего количества.

Растворенные, коллоидальные вещества и гумусовые комплексы окрашивают воду Ладожского озера в желтые и бурые тона. Цветовые координаты ладожской воды незначительно варьируют от места к месту и от года к году. Так, координата  $\lambda$  изменяется от  $569$  до  $573 \text{ нм}$ , а координата  $\rho$  - от  $67$  до  $73\%$  (табл. 2).

По данным Г.Ф. Расплетинной (1982), цветность воды в преобладающей части Ладожского озера изменяется незначительно - в пределах  $24-36^\circ$ . Исключением из этого правила является Волховская губа, где вариация цветности, вызванная эпизодическим вторжением озерной воды, лежит в пределах  $26-126^\circ$ .

Органическое окрашенное вещество по происхождению делится на терригенный и планктонный гумус. Основная часть этих веществ попадает в озеро с водами рек, протекающих через заболоченные участки водосбора, и со сточными водами. Другая, меньшая, часть образуется в самом озере в процессе отмирания и разложения планктонных организмов и растительных остатков. В обычных условиях это устойчивые соединения. Под влиянием ультрафиолетового и жест-

Т а б л и ц а 2

Некоторые оптические и гидрохимические параметры  
водной среды Ладожского озера

Параметр	Минимум	Максимум
Показатель общего ослабления, $(\lg \epsilon)$ , $\text{м}^{-1}$		
центр озера (поверхность)	0,8	1,2
прибрежье (поверхность)	1,4	2,6
глубины более 15 м	0,3	0,5
Показатель рассеяния $(\beta)$ , $\text{м}^{-1}$	0,50	0,70
Показатель поглощения $(\alpha)$ , $\text{м}^{-1}$	0,30	0,50
Показатель вертикального ослабления (ФАР=420-720 нм) $(\alpha)$ , $\text{м}^{-1}$	0,80	1,30
Глубина видимости диска (ОП), м	2,5	4,5
Цветность воды (Цв), град.	23,0	34,0
pH	7,20	9,50
Электропроводность $(\sigma)$ , $\text{мксим}\cdot\text{см}^2$	80,2	82,2
Показатель преломления частиц		
биологических $(n)$	1,05	1,08
минеральных $(n)$	1,15	1,20
Цвет воды		
координата $\lambda$ , см	569	573
координата $\rho$ , %	67	73

кого излучения в гуминовых комплексах поверхностной пленки воды может происходить разрыв водородных связей и образование промежуточных продуктов разложения гумусовых веществ.

Окрашивающие растворенные гуминовые комплексы являются высокомолекулярными соединениями, способными расщепляться также и под действием других внешних факторов: вод влиянием растворенного кислорода, под действием реактивных веществ при смешении водных масс, при замерзании-размерзании и под действием других деструктурирующих агентов. Это приводит к значительному изменению их свойств и в конечном итоге - к осветлению первых 1-2 см воды и увеличению их светопропускной способности. Такое осветление воды особенно хорошо прослеживается ранней весной сразу после ледостава при тихой погоде. Экспериментальным путем на образцах ладожской воды было установлено, что при замораживании и размораживании прозрачность воды увеличивается максимально на 15-20%, а гумусовые соединения в виде хлопьев переходят в разряд лабильных веществ и вступают в пищевую цепь бактериального и планктонного населения вблизи поверхностной пленки воды.

#### Л и т е р а т у р а

Петрова Н.А. Уровень количественного развития и флористический состав фитопланктона. - В кн.: Антропогенное

эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982, с. 124-131.

Расплетина Г.Ф. Режим биогенных элементов в Ладожском озере. - В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982, с. 79-101.

О.Е. Короткевич, В.Б. Румянцев (ИНОЗ АН СССР),  
Б.Я. Гайцхоки, Е.С. Володин (ААНИИ)

## РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ВОДЕ КРУПНЫХ ОЗЕР

Исследование характера оптического излучения в водах крупных озер важно как при изучении особенностей их гидрологического режима, так и при решении ряда прикладных задач, в том числе связанных с дистанционными исследованиями озер. Особое значение при этом имеет исследование первичных гидрооптических характеристик, необходимое, в частности, для построения оптических моделей, что является одним из наиболее важных вопросов, связанных с применением дистанционных методов в лимнологии. Поскольку ослабление света складывается из величин его поглощения и рассеяния, определение последних приобретает в гидрооптике особенно важное значение.

Работы по исследованию рассеяния света в ладожских и онежских водах различного происхождения и состава проводились с помощью спектрогидрофелометра-прозрачномера СГН-57, разработанного в ГОИ им. С.И. Вавилова. Измерение значений показателя ослабления и индикатрис рассеяния света выполнялось на участке спектра  $\lambda = 530-555$  нм ( $\lambda_{эф} = 545$  нм). Эта зона находится в области, близкой к максимальной прозрачности для всех озерных водных масс, что повышает точность измерений показателей рассеяния света. Юстировка, градуировка прибора и обработка результатов измерений проводились в соответствии с методикой ГОИ и ИОАН.

Вычисление показателя яркости рассеянного света  $\beta$  в направлении  $\varphi$  производится по формуле

$$\beta_{\varphi} = \left( \frac{r_{ГР}\varphi}{T_{п} \cdot T_{в}} - r_{БЛ}\varphi \right) \frac{n^2}{L_{\varphi}},$$

где  $r_{ГР}$  - коэффициент яркости, снятый с градуировочных графиков;  $T_{п}$  - коэффициент увеличения пропускания при заполнении прибора идеально прозрачной водой;  $T_{в}$  - поправка, учитывающая ослабление светового пучка в кювете прибора;  $L_{\varphi}$  - толщина воды, в которой происходит рассеяние света;  $n$  - коэффициент преломления.

Показатель рассеяния вычисляется по приближенной формуле

$$\sigma = 0.0003 \beta_{1^{\circ}} + 0.00096 \beta_{2.5^{\circ}} + 0.0019 \beta_{4^{\circ}} + 0.0048 \beta_{6^{\circ}} + \\ + 0.0118 \beta_{10^{\circ}} + 0.041 \beta_{20^{\circ}} + 0.12 \beta_{30^{\circ}} + 0.33 \beta_{50^{\circ}} + 0.74 \beta_{90^{\circ}} + \\ + 0.47 \beta_{150^{\circ}}$$

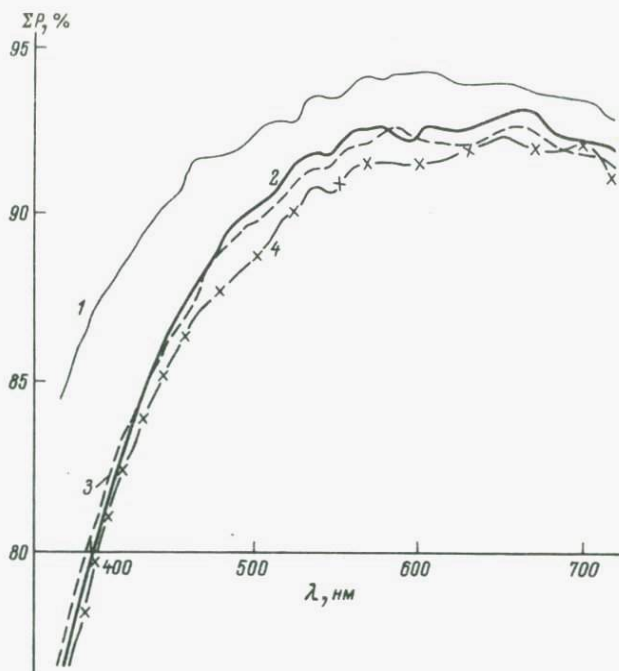


Рис. 1. Спектры пропускания вод Ладожского озера.

1 - поверхностные озерные воды; 2 - воды р. Волхов; 3 - воды р. Сясь; 4 - озерные воды со сточными водами ЦЗ.

Максимальная прозрачность исследованных вод лежит в средне- и длинноволновой областях спектра, причем исследованные прибрежные воды Ладожского озера достаточно сходны между собой по характеру спектральных функций пропускания и резко отличаются по этой характеристике от поверхностных вод центральных частей Ладожского и Онежского озер (рис. 1).

Все воды, исследованные на светорассеивающие свойства, имеют сильно вытянутые индикатрисы (рис. 2). По величине общего ослабления света воды рек Волхов и Сясь практически неразличимы, но по интенсивности рассеяния света в передней и задней полусферах они существенно различаются, что вызвано, по-видимому, разным соотношением „мелких“ и „крупных“ частиц в этих водах. Характерная особенность индикатрис волховских вод - наличие излома в области углов, близких к  $15^\circ$ , что свидетельствует о своеобразии спектра взвешенных частиц. Для получения более точных сведений по этому вопросу следует провести одновременные измерения спектров распределения частиц. Результаты исследований указывают на преобладание процесса рассеяния в общем ослаблении света, харак-

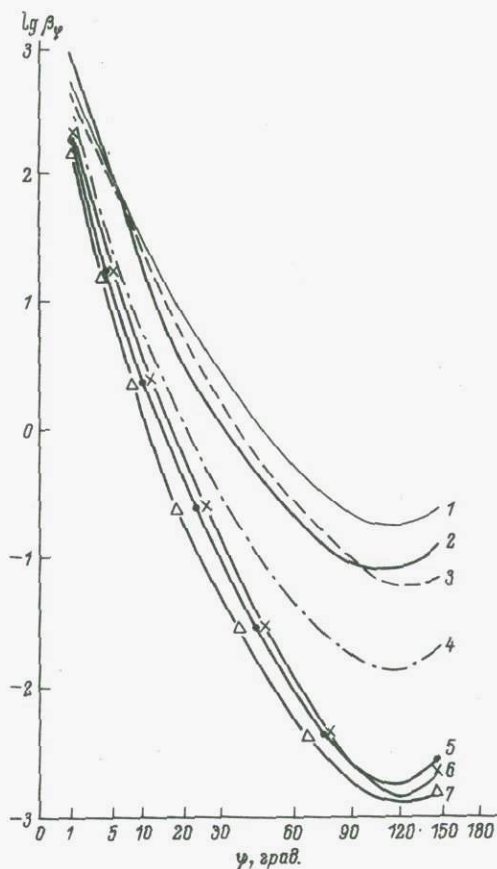


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния света в водах Ладожского и Онежского озер.

1 - поверхностные воды Ладожского озера; 2 - воды р. Волхов; 3 - воды р. Сясь; 4 - воды Ладожского озера со сточными водами ЦЗ; 5-7 - воды южной, северной и центральной частей Петрозаводской губы Онежского озера.

терное для озерных и речных вод (табл. 1). Рассеяние достигает 97% у вод р. Сясь и составляет не менее 60% в наиболее чистых исследованных озерных водах.

В качестве параметра, характеризующего форму индикатрисы, принято значение  $\lg \beta_{15^\circ} / \lg \beta_{90^\circ}$  (Войтов, Копелевич, 1970). По этой характеристике (табл. 2) четко выделяются три группы индикатрис, соответствующие водам притоков и загрязненным водам Ладожского озера (I), чистым поверхностным водам этого озера (II) и поверхностным водам Онежского озера (III).

Т а б л и ц а 1

Величины общего ослабления ( $\epsilon$ ) и рассеяния ( $\sigma$ ) света у вод Ладожского и Онежского озер ( $\text{м}^{-1}$ )

Водные массы	$\epsilon$	$\sigma$	$\sigma/\epsilon$
Петрозаводская губа			
центр	0,318	0,21	0,66
юг	0,559	0,55	0,98
север	0,382	0,37	0,95
Ладожское озеро, центр	0,85	0,50	0,59
Река Волхов	2,9	2,08	0,71
Река Сясь	2,7	2,61	0,97
Озерные воды со сбросами ЦЗ	2,4	2,22	0,92

Т а б л и ц а 2

Группы индикатрис рассеяния вод Ладожского и Онежского озер

Группа индикатрис	Диапазон изменения	Средние значения	
	$\lg \beta_{15^\circ} / \lg \beta_{90^\circ}$	$\lg \beta_{15^\circ} / \lg \beta_{90^\circ}$	$\lg \beta_{90^\circ}$
I	1,7-2,0	1,84	-0,15
II	2,0-2,3	2,05	-1,71
III	2,3-2,6	2,44	-2,61

Увеличение вытянутости индикатрис в значительной мере связано с уменьшением абсолютных значений рассеяния в области углов больших  $15^\circ$ , что позволяет сделать вывод о существенном уменьшении влияния мелких частиц при менее значительном (а в ряде случаев и несущественном) изменении влияния крупной фракции взвесей.

## Л и т е р а т у р а

- В о й т о в В.И., К о п а л е в и ч О.В., Индикатрисы рассеяния света морской водой. - ДАН СССР, 1970, т. 190, № 4, с. 827-830.
- Г а й ц х о к и Б.Я. Оптические исследования вод Петрозаводской губы Онежского озера. - Тр. ААНИИ, 1974, т. 324, с. 182-186.
- Е г о р о в Ю.С., Р у м я н ц е в В.Б., Ю д и н Е.А. Оптические характеристики и взвеси. - В кн.: Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л., 1982, с. 61-69.
- П е т р о в Б.М. Прозрачность и цветность воды Ладожского озера. - Тр. Лабор. озеровед. ЛГУ, 1967, т. 23, с. 156-215.

К.Я. Кондратьев, О.Е. Короткевич (ИНОЗ АН СССР),  
О.Б. Васильев, В.С. Гришечкин, Л.Н. Поберовская,  
Т. Фараго (НИИФ ЛГУ)

## ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Одной из задач, решаемых в лимнологии с помощью дистанционных методов, является распознавание и картирование водных масс различного происхождения и состава, определение их границ. Решение этой задачи возможно, в частности, путем использования цвета вод как их индикатора. Цветовые характеристики озерных вод являются функцией качественного и количественного состава взвешенных и растворенных веществ. Это позволяет устанавливать взаимосвязи цветовых координат водных масс с различными гидрофизическими характеристиками природных вод. В озероведении накоплен обширный материал по связям цветности вод с содержанием минеральных взвесей, гуминовых соединений, хлорофилла и других органических веществ в воде, электропроводностью, окисляемостью и рядом других характеристик. Поэтому получение данных о цвете открывает разнообразные перспективы исследования их качества.

В практике дистанционных исследований природной среды используют различные способы количественного выражения цвета изучаемых поверхностей: наборы коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) для различных длин волн, „цветовые“ отношения (отношения КСЯ на определенных длинах волн), цветовые координаты, цветовые индексы и др. (Исследования природной среды..., 1972; Bukata et al., 1981). Наиболее широко используется метод цветовых координат, которые определяются путем разложения кривой спектральной яркости по трем базисным функциям с последующей нормировкой. Цветовые координаты ( $x, y, z$ ) являются математическим выражением цветового восприятия предметов человеком. Кодирование спектра с их помощью эквивалентно нормированию первичных признаков ( $x + y + z = 1$ ). Поскольку цвет вод полностью определяется любой парой цветовых координат, их векторы можно изображать на плоскости в прямоугольной системе координат.

Распознавание водных масс Ладожского озера (в рассматриваемом случае Свирской губы) осуществлялось с помощью цветовых характеристик, полученных из экспериментальных комплексных исследований акватории озера с применением дистанционных и контактных методов (Васильев и др., наст. сб., с. 187-207).

Исследовалась возможность разделения водных масс по кластеризации точек на плоскостях  $x, y$ ,  $x, z$  либо  $y, z$ . Анализ кластеризации цветовых координат показал, что наиболее удобным является использование распределения точек на плоскости  $x, z$  и картирование по координате  $z$  (рис. 1, а, б). В этом случае точки, принадлежащие различным водам, располагаются в системе цветовых координат вдоль прямой, проходящей от синих, сине-зеленых через нейтральные до желтых цветов. По мере перехода к прибрежным водам и водам притоков со значительными количествами взвешенных веществ поля

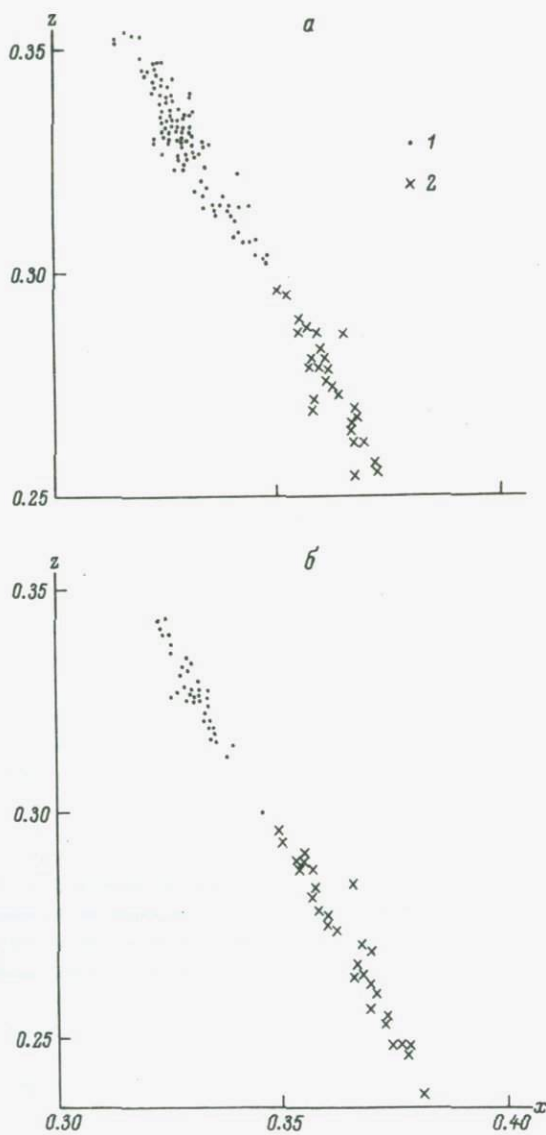


Рис. 1. Распределение цветовых координат  $x$ ,  $z$  и  $u$ ,  $v$  различных точек акватории Свирской губы по наблюдениям.

а - 14 06 83; б - 15 06 83: 1 -  $\alpha > 0,8$ , 2 -  $\alpha \leq 0,8$ ; в - 14 06 83: 1 -  $\alpha > 0,8$ , 2 -  $0,8 > \alpha > 0,6$ ; 3 -  $\alpha \leq 0,6$ .

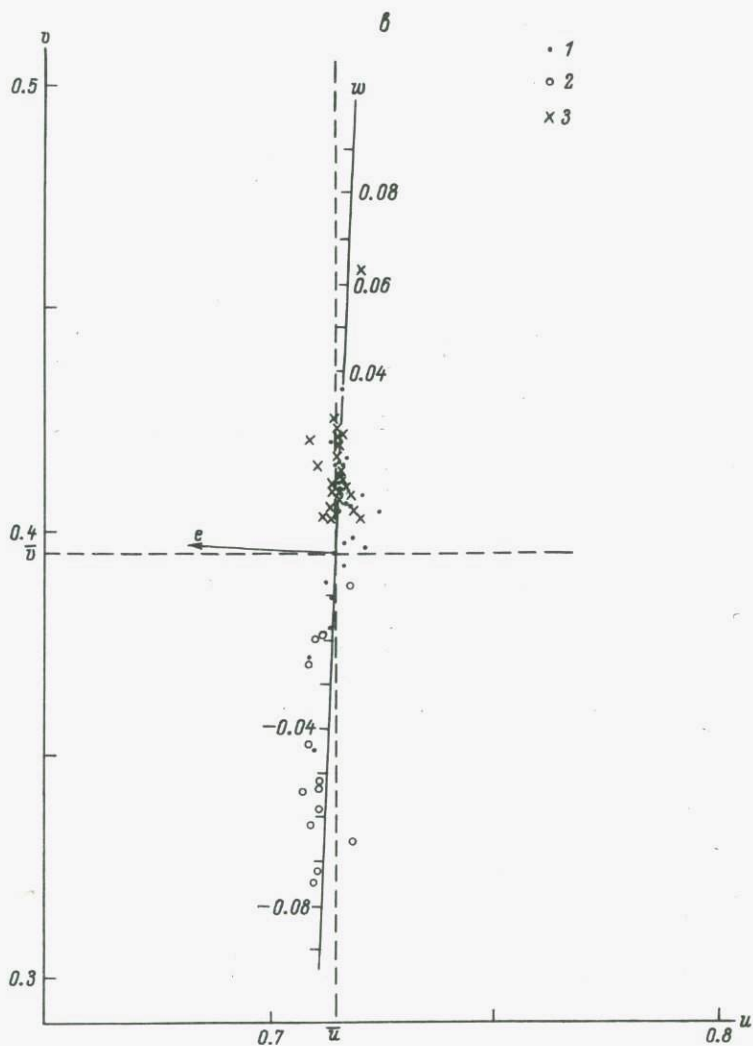


Рис. 1 (продолжение).

точек переходят в желто-коричневую область. Однако переход к новой системе координат  $uv$ , лежащей в плоскости цветового треугольника и связанной с традиционной трехмерной системой цветовых координат  $xyz$  соотношениями  $u = (2y + z)/\sqrt{2}$  и  $v = \sqrt{3/2} \cdot z$ , позволил существенно упростить задачу.

Представленные на рис. 1, в новых координатах  $uv$  результаты дистанционных измерений цветовых характеристик озерных вод по наблюдениям 14 06 83 (и цветового индекса  $\mathcal{E} = r_{\lambda=550}/r_{\lambda=430}$ ) говорят о существовании сильной линейной корреляции  $v$  по  $u$ , а применение метода главных компонент позволяет получить одномерный признак цвета водной массы. В нашем случае  $\bar{u}=0.715$  и  $\bar{v}=0.395$  и первый собственный вектор автоковариационной матрицы выборки  $\{(u, v)\}$  будет  $\omega=(0.0433; 0.9991)$ . В окончательном виде имеем оптимальное преобразование

$$\omega = 0.0433(u - 0.715) + 0.999(v - 0.395).$$

Как известно, информативность такого признака оценивается относительной величиной дисперсии, которая легко подсчитывается с помощью собственных чисел ( $l_1$  для координаты  $\omega$  и  $l_2$  для ортогональной координаты  $\varphi$ ). Проведя необходимые вычисления, получаем  $l_1/(l_1 + l_2) = 0.98$ , что полностью подтверждает исходную гипотезу о возможности получения и применения одномерного признака цвета  $\omega$ .

На рис. 2, а-в показано распределение цветовой координаты по акватории Свирской губы 14 и 15 июня 1983 г. Сопоставляя распределение величин координаты  $Z$  и данные судовых наблюдений на акватории губы, можно сделать вывод о присутствии здесь двух водных масс - вод р. Свирь и поверхностных озерных вод. Из сравнения с материалами контактных наблюдений установлено, что граница между этими водными массами близка к положению изолинии  $Z = 0.300$  (от 0.298 до 0.305 для двух дней съемок). Для Свирских вод величины этой координаты колеблются от 0.235 до 0.300, а для озерных вод - от 0.300 до 0.355, составляя в среднем 0.265 и 0.325 соответственно.

Кроме разделения вод по цветовым координатам была проведена их идентификация по значениям отношения величин КСЯ для длин волн 550 и 430 нм ( $\mathcal{E}$ ). Граница раздела рассматриваемых водных масс близка к положению изолинии  $\mathcal{E} = 0.79$ , что совпадает с границей этих вод, найденной по цветовым координатам  $Z = 0.302$  и  $Z = 0.291$  для двух дней съемки.

Рис. 2, г представляет собой карту Свирской губы с нанесенными на нее значениями параметров  $\omega$  (цифры означают  $\omega \cdot 10^2$ ) по наблюдениям 14 06 83. Проведенные изолинии  $\omega_1 = 0.01$  и  $\omega_2 = -0.01$  („серый“ цвет) позволяют судить о наличии прибрежных водных масс, приносимых р. Свирь, и поверхностных озерных вод.

Подобное разграничение подтверждается результатами многолетних наблюдений электропроводности и других характеристик водных масс в Свирской губе в июне, что позволяет судить об их физико-химических характеристиках.

Таким образом, рассмотренные результаты свидетельствуют о хорошей сходимости распознавания водных масс и оконтуривания их границ по значениям цветовых координат и данным контактных измерений. Это подтверждает перспективность использования обсуж-

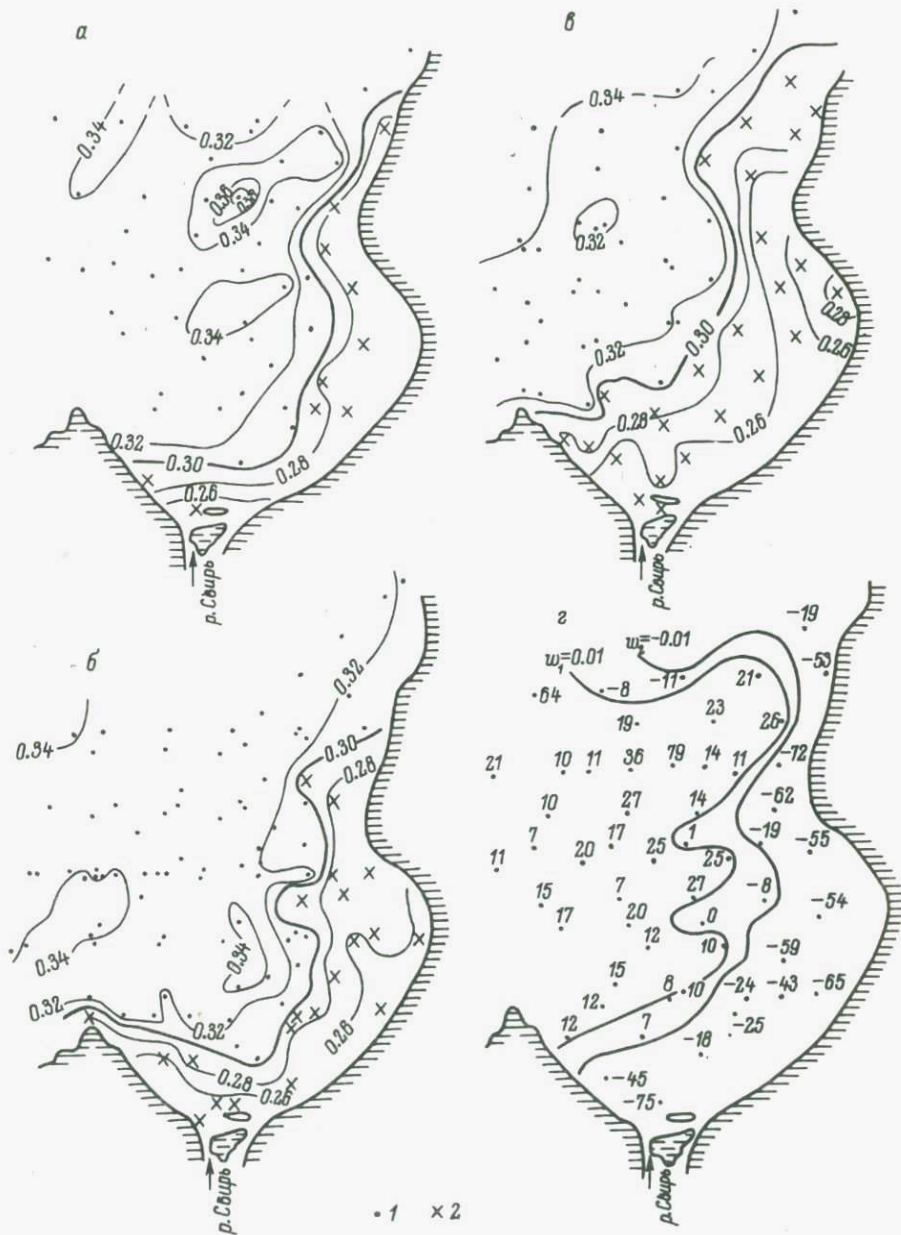


Рис. 2. Распределение цветковых координат  $Z$  и  $\omega$  по акватории Свирской губы по наблюдениям 14 06 83 и 15 06 83.

а - 15 06 83; б - 14 06 83 до 12 ч; в - 14 06 83 после 12 ч; г - 14 06 83; 1 -  $\omega > 0,8$ , 2 -  $\omega \leq 0,8$ .

даемой методики для дистанционного картирования озерных водных масс и вод притоков, а также для установления положения и характера их границ.

### Л и т е р а т у р а

- В а с и л ь е в О.Б., Г р и ш е ч к и н В.С., К о в а л е н к о А.П., Т о в с т е н к о И.А., Ш у л ь ц Э.О. Спектральная информационно-измерительная система для исследования поля коротковолнового излучения в атмосфере с земной поверхности и с самолета. - Наст. сб., с. 225-238.
- И с с л е д о в а н и я природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Л., 1972. 400 с.
- В u k a t a R.P., J e r o m e J.H. Optical water quality model of lake Ontario. - Appl. Opt., 1981, vol. 20, N9, p. 1696-1714.

Л.Ф. Барышева

### К ВОПРОСУ О ВЗАИМНОМ СООТВЕТСТВИИ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЛИМНОЛОГИИ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД

По способу описания цвета, принятому Международной комиссией по освещенности (МКО), устанавливается соответствие между цветом и точкой в системе прямоугольных координат  $x, y, z$  (Гуревич, 1950). Графическим отображением поля реальных цветов является цветовой треугольник, определяемый координатами трех монохроматических равноинтенсивных излучений (700,0, 546,1, 435,8 нм) и ограниченный линией спектральных цветов. Расчет цветových координат проводится по стандартным колориметрическим функциям  $f\bar{x}(\lambda), f\bar{y}(\lambda), f\bar{z}(\lambda)$  спектральной чувствительности человеческого глаза:

$$x = \frac{\int J(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int J(\lambda) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda},$$

$$y = \frac{\int J(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int J(\lambda) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda},$$

$$z = \frac{\int J(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int J(\lambda) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda},$$

где  $J(\lambda)$  - интенсивность излучения источника;  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  - удельные координаты цвета.

Из формул видно, что сумма координат  $x, y, z$  любой цветовой точки равна единице, т.е. цвет может быть задан двумя координатами. Другим способом цвет может быть определен на плоскости как вектор из точки центра тяжести цветового треугольника, который характеризует белый цвет. В этом случае одной из харак-

теристик цвета является цветовой тон, обозначаемый длиной волны  $\lambda$ , другой — чистота цвета „ $p$ “, т.е. мера яркости данного цветового тона. Между этими двумя способами описания цвета установлена функциональная связь. Трехцветные координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  могут быть вычислены как для непосредственного излучения источника, так и для излучения, прошедшего через слой прозрачного вещества. В этом случае цвет будет зависеть и от первоначального спектрального состава излучения, и от оптических свойств исследуемого вещества.

В гидрохимической практике предпринимались попытки использовать цвет для получения сведений о составе и свойствах воды. Наблюдаемый цвет воды формируется при участии всех оптически активных компонентов водного раствора, как светорассеивающих, так и светопоглощающих. Исторически сложилось так, что четкие физические концепции цвета не получили применения и методы определения цвета воды были основаны на чисто визуальных наблюдениях. Такой подход не мог претендовать на полноту, но эти методы благодаря своей доступности получили широкое распространение. Таким образом, в настоящее время не только накоплено большое количество данных по визуальной оценке цвета вод, но и найдены соответствующие привязки к некоторым составляющим водного раствора. Б.А. Скопинцев (1950) приводит следующие наблюдения изменения синего цвета 5-метрового столба дистиллированной воды при добавлении к ней растворимых органических веществ (РОВ): при концентрации гумата 0,020 мг/л цвет оставался практически тем же, при 0,025 мг/л становился зеленовато-синим, при 0,050 мг/л — зеленым, при 2,000 мг/л — желто-коричневым.

Растворимые органические вещества в водоемах представлены в основном гуминовыми и фульвокислотами и их водорастворимыми производными, характерными особенностями которых являются их желто-бурая окраска и высокая биохимическая устойчивость. Помимо самой воды РОВ являются главными светопоглощающими компонентами. Кроме гуминовых соединений в природных водах обнаружены белковые и белковоподобные вещества, углеводы, жиры, ферменты и другие компоненты, однако все они составляют крайне малую часть всей массы органических веществ природных вод и на цвет воды оказывают незначительное влияние.

К светорассеивающим компонентам природных вод относятся взвешенные вещества различной крупности, органического и неорганического происхождения. В отличие от взвесей в морских и океанических водах в водах континентальных водоемов значительное количество взвесей окрашено частично вследствие коагуляции высокомолекулярных соединений коллоидного типа, частично вследствие сорбции на поверхности частиц различных окрашивающих веществ, например гидроокиси железа. Известно, что железо и марганец могут образовывать с органическими веществами, в том числе и с гуминовыми, сложные окрашенные устойчивые комплексы органо-минеральных соединений (Самарина, 1977). Значительный вклад в формирование цвета воды могут вносить живые организмы, особенно

бактериопланктон и фитопланктон. Многие виды планктона окрашены, цвет их варьирует в широких пределах — от сине-зеленого до красного и в период массового развития может стать определяющим фактором окрашенности воды.

В полевых условиях цвет воды определяют по шкале цветности Фореля—Уле. Шкала представляет собой набор пробирок (1—21) с разноокрашенными жидкостями, приготовленными из различного соотношения синего, желтого и зеленого растворов. При наблюдении цвет пробирки сравнивается с цветом столба воды, рассматриваемого на фоне стандартного белого диска, погруженного на глубину, равную половине глубины условной прозрачности. Величина этого рассматриваемого столба воды может меняться от десятков сантиметров до десятков метров, цвет воды при этом отождествляется с соответствующим номером пробирки.

Широкое распространение получил метод определения цветности воды по платиново—кобальтовой шкале (Алекин, Семенов, Скопинцев, 1973). Суть его заключается в уравнивании цвета анализируемой пробы и дистиллированной воды при добавлении к последней стандартного раствора хлор—платины калия с хлористым кобальтом (раствор имеет насыщенную оранжевую окраску), результаты выражаются в условных единицах — градусах платиново—кобальтовой шкалы. Сравнение проводится в стеклянных цилиндрах одинакового диаметра, обычный объем пробы — 100 мл, высота столба — около 20 см. Основное условие сравнения — одинаковость слоя стандартного раствора и пробы. Этот метод, несмотря на условность получаемых показателей, получил широкое распространение в лимнологической практике, давая возможность сравнения различных по интенсивности окраски вод и получения первичной информации о возможном содержании в них органических веществ.

Наличие такой связи подтверждается данными об изменчивости отношения цветности воды к содержанию в ней органического углерода в различных цветовых интервалах, приводимыми Б.А. Скопинцевым (1950) для озер штата Висконсин, и такими же отношениями, рассчитанными автором для Ладожского озера и его притоков по данным Н.Ф. Соловьевой (1967а, б) (см. табл.).

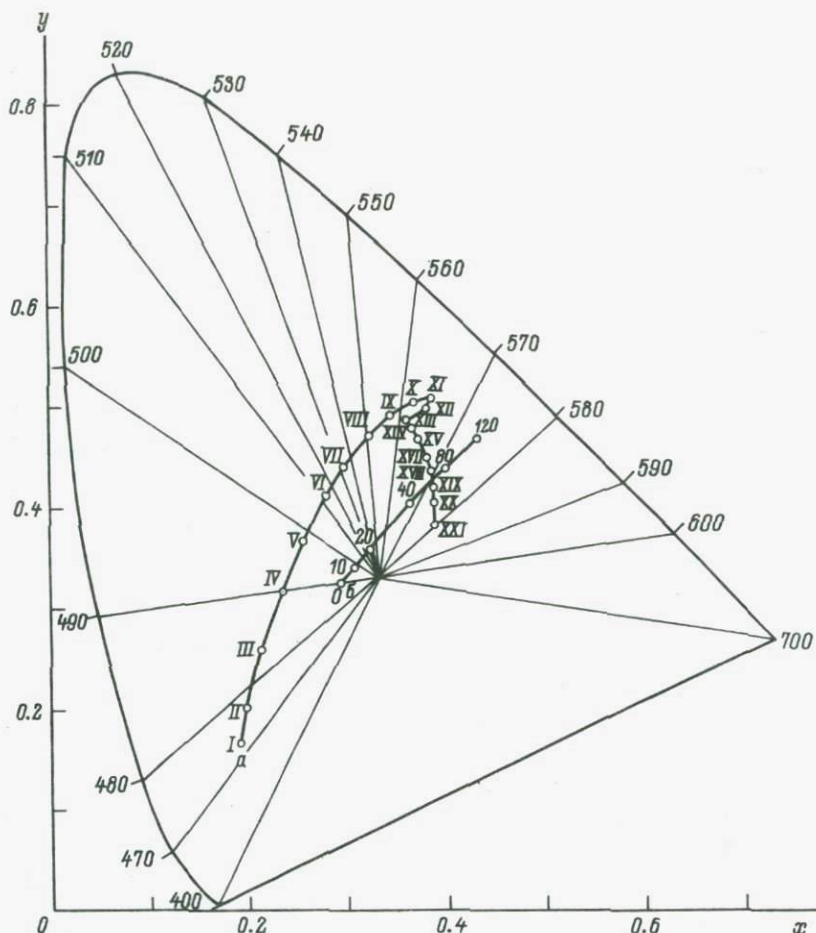
Рассмотренные методы определения цвета воды основаны на визуальной оценке цвета и его интенсивности, но известны и другие, например использование светопоглощительной способности вод, когда длина волны максимального поглощения света принимается за характеристику цвета, а величина оптической плотности рассматривается как мера интенсивности окраски (Лурье, Рыбникова, 1966). В лимнологической практике этот метод не получил широкого распространения из-за частого несовпадения длин волн максимального светопоглощения разнотипными озерными водами, что значительно уменьшает возможность сравнения вод между собой.

Метод, основанный на инструментальных наблюдениях во всем диапазоне длин волн видимого участка спектра, позволяет получать более объективные, физически обоснованные цветовые характеристики. С этой целью были получены спектры пропускания цветных раст-

Интервал изменчивости цветности, град.	Цветн./С <sub>орг</sub> для озер ш. Висконсин, град./мг·л <sup>-1</sup>	Цветн./С <sub>орг</sub> для Ладожского озера, град./мг·л <sup>-1</sup>
0-9	1,3	
10-19	3,1	
20-29	4,3	4,0
30-39	4,5	4,0
40-49	5,3	4,7
50-59	5,9	5,2
60-69	6,3	6,3
70-99	7,0	7,3
100-129	8,0	8,3
130-159	9,0	9,1
160-199	10,4	
200-340	12,5	

воров шкал и по приведенным выше формулам рассчитаны координаты соответствующих точек в трехцветной колориметрической системе МКО (рисунок). При этом за функцию источника света принималось распределение энергии в спектре рассеянной солнечной радиации для безоблачного неба в относительных единицах (Радиационные характеристики..., 1969), так как по условиям методики определение цвета по шкалам должно проводиться в солнечной тени при достаточно хорошем освещении. Необходимо иметь в виду, что всякое изменение функции источника света неизбежно приведет к смещению функции координат. Оптические свойства светопропускающего слоя цветных растворов учитывались введением под знак интеграла коэффициентов спектрального пропускания. Линия цветов, соответствующих шкале Фореля-Уле, охватывает интервал от синего (470 нм) до оранжевого (580 нм). Первые одиннадцать точек относятся к синему и зеленому цветам, с появлением желто-оранжевого тона (точки 12-21) кривая резко изменяет направление. Лocus цветности платиново-кобальтовой шкалы начинается в синезеленой области (~490 нм) вблизи точки белого тона и располагается в основном в желто-зеленой области (560-575 нм). Пересекаются кривые на границе желтой и желто-зеленой областей (~570 нм) в непосредственной близости к точке X1X. Следует отметить, что метод определения цветности по платиново-кобальтовой шкале справедливее было бы называть методом определения интенсивности желтого тона в воде; поскольку цветность по платиново-кобальтовой шкале фактически является мерой желтого тона, она и применяется в лимнологической практике как один из косвенных показателей содержания в воде РОВ, имеющих большей частью желтую окраску.

Таким образом, нами найдено взаимно однозначное соответствие между наиболее употребительными шкалами, предназначенными для характеристики окрашенности вод. Полученные данные являются ис-



Расположение цветковых шкал в цветовом треугольнике.

I—XXI — индексы цветов по шкале Фореля—Уле,  $\alpha$ —120 — градусы цветности для платиново—кобальтовой шкалы.

ходной предпосылкой для осуществления следующего этапа работы, заключающегося в нахождении соответствия между дистанционно определяемыми (по яркости рассеянного водой света) цветовыми координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и цветовыми характеристиками по платиново—кобальтовой шкале и шкале Фореля—Уле.

#### Л и т е р а т у р а

А лекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.  
Руководство по химическому анализу вод суши, Л., 1973. 270 с.

- Гуревич М.М. Цвет и его измерение. М.; Л., 1950. 268 с.
- Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. М., 1966. 280 с.
- Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности/Под ред. К.Я. Кондратьева. Л., 1969. 564 с.
- Самарина В.С. Гидрогеохимия. Л., 1977. 360 с.
- Скопичев Б.А. Органическое вещество в природных водах. Л., 1950. 290 с.
- Соловьева Н.Ф. Гидрохимия притоков Ладожского озера и р. Невы. - В кн.: Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л., 1967а, с. 5-59.
- Соловьева Н.Ф. Элементы химического баланса Ладожского озера. - В кн.: Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л., 1967б, с. 123-155.

К.Я. Кондратьев, Г.В. Дружинин,  
С.Ю. Островский (ИНОЗ АН СССР), П.П. Федченко (ВНИИСХМ)

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В НЕЙ ВЗВЕСЕЙ И ХЛОРОФИЛЛА

В 1984 г. были проведены исследования с целью разработки неконтактного метода определения содержания хлорофилла в озерных водах.

Для исследования влияния оптически активных компонент на спектр выходящего из воды излучения был изготовлен экспериментальный бассейн размером 3х3 м и глубиной 2 м. Чтобы исключить постороннее влияние на измеряемую яркость, стенки и дно бассейна покрывались черной полиэтиленовой пленкой. Бассейн заполнялся водой, а затем над ее поверхностью измерялись коэффициенты яркости. После добавления в воду некоторого количества фитопланктона вода перемешивалась и измерения повторялись. Фотометрирование проводилось с помощью полевого спектрометра с дискретной разверткой спектра и линзового фотометра (Федченко, Кондратьев, 1981). Приборы устанавливались над центральной частью бассейна на высоте 1,5 м. Измерения проводились в ясную погоду при высотах Солнца более 30°. Каждое измерение сопровождалось отбором воды и определением в ней концентрации хлорофилла спектрофотометрическим методом по методике ЮНЕСКО (ICOR-UNESCO, 1966). По полученным спектральным кривым коэффициента яркости рассчитывались координаты цвета.

Анализ полученных данных показал наличие тесной связи суммы координат цвета с концентрацией хлорофилла в воде (коэффициент корреляции +0,98). На рис. 1 представлен график зависимости суммы координат цвета от содержания хлорофилла в воде (по данным измерений линзовым фотометром). Подобная же зависимость, показывающая, что увеличение концентрации хлорофилла приводит к умень-

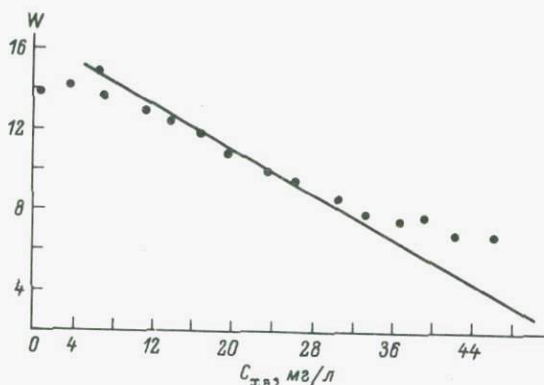


Рис. 1. Зависимость суммы координат цвета от концентрации хлорофилла ( $W=15.2-0.17 C_{хл}$ ).

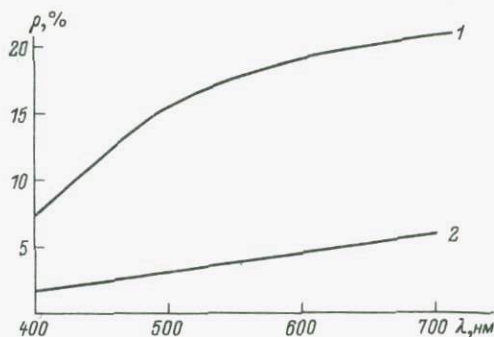


Рис. 2. Зависимость коэффициента яркости песка (1) и глины (2) от длины волны падающего излучения.

шению суммы координат цвета, получена и при измерениях полевым спектрометром.

Однако в озерных водах присутствует не только фитопланктон, но и другие оптически активные компоненты (например, неорганические взвеси и растворенное органическое вещество). Поэтому в качестве продолжения эксперимента в бассейне были проведены работы по изучению влияния минеральных взвесей на цветовые характеристики воды и возможности определения содержания хлорофилла на фоне различных концентраций взвесей. На рис. 2 представлены спектральные кривые отражения крупной взвеси (песок) и мелкодисперсной взвеси (глина), измеренные с помощью линзового фотометра. Форма кривых КСЯ этих образцов одинакова, но песок имеет более высокую величину отраженной яркости по всему спектру. Поскольку форма спектральных кривых коэффициента яркости чистой воды и взвесей различна, добавление в воду даже небольшого коли-

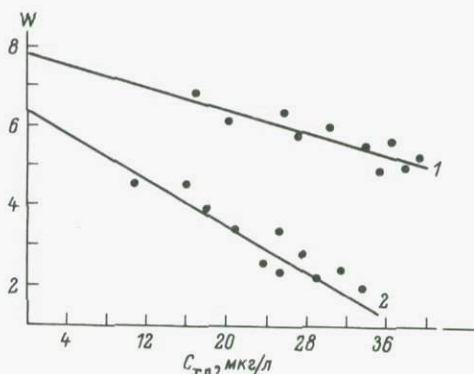


Рис. 3. Зависимость суммы координат цвета от концентрации хлорофилла при различном содержании неорганических взвесей в воде. 1 - 23,2, 2 - 10,8 мг/л.

чества взвесей сказывается на спектральном составе выходящего из воды света.

В бассейн помимо фитопланктона добавлялись взвеси в различных концентрациях. Полученные зависимости представлены на рис. 3, из которого видно, что спектральная яркость воды зависит не только от количества хлорофилла, но и от отражательной способности взвесей, содержащихся в воде, причем наклон кривой тем больше, чем меньше содержание в воде неорганической взвеси.

На следующем этапе этого эксперимента предполагается исследовать степень влияния на КСЯ растворенных в воде органических веществ.

#### Л и т е р а т у р а

- Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. Л., 1981, с. 73-82.  
 I S O R - U N E S C O, Report of Scor UNESCO working group 17 on determination of photosynthetic pigments. - In: Determination of photosynthetic pigments in sea water, 1966, p. 9-18.

В.В. Брук, И.И. Мальхина, Ф.Т. Шумаков (ВНИИВО),  
 Г.В. Дружинин (ИНОЗ АН СССР)

#### О КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЯХ МЕЖДУ ГИДРООПТИЧЕСКИМИ И ГИДРОХИМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВОД ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

В юго-восточной части Ладожского озера (там, где наблюдается контакт различных типов вод) 13 и 14 июня 1983 г. был проведен трехступенчатый подспутниковый эксперимент. В этом районе



Схема сети станций гидрологической съемки 13-го (1), 14-го (2) июня 1983 г.

воды рек Волхов и Сясь, подверженные промышленному и сельскохозяйственному загрязнению, имеют значительные концентрации взвесей и биогенных элементов, а воды р. Свирь бедны биогенными элементами.

Гидрологическая съемка выполнялась следующим образом. На каждой станции с помощью переносных приборов производства ПНР (кондуктометр типа № 5721, рН-метр типа № 5123, универсальный оксиметр типа № 5221) производились измерения электропроводности ( $\sigma$ ), температуры воды ( $T$ ), процентного содержания кислорода ( $O_2$ ) и рН. Кроме того, определялась прозрачность воды по диску Секки ( $D_c$ ), а также отбирались пробы на 42 станциях по схеме, приведенной на рисунке. Схема расположения станций была выбрана таким образом, чтобы был обеспечен наибольший контраст между измеряемыми характеристиками.

В пробах воды в лабораторных условиях определялись концентрации общей взвеси и ее минеральной и органической составляющих, а также содержание хлорофилла „а“, „б“ и „с“ и общего фосфора (Р). Взвеси определялись весовым методом (Лисицын, 1956), хлорофилл – по методике, изложенной в „Руководстве по методам гидробиологического анализа...“ (1983), а общий фосфор – методом сожжения с персульфатом (Унифицированные методы..., 1977).

Из работы Голубицкого и др. (1974) известно, что коэффициент спектральной яркости водной поверхности зависит от показателей ослабления и рассеяния света водой. Поэтому для оценки примени-

мости дистанционных методов для фиксирования разнотипных вод производились измерения спектрального пропускания фильтрованной и нефильтованной воды при помощи спектрофотометра СПЕКОЛ-10 производства ГДР на длинах волн 350, 450, 550, 750 и 850 нм.

Определение корреляционных связей и получение уравнений линейной регрессии между гидрооптическими характеристиками и гидрохимическими показателями вод Ладожского озера производилось с использованием Пакета научных программ MISR (Математическое обеспечение..., 1973). На ЭВМ ЕС-1022 были получены матрица коэффициентов корреляции и уравнения линейной регрессии между характеристиками озерных вод и спектральным пропусканием (%) нефильтованных вод Ладожского озера:

Общий фосфор, мкг/л	$P = -2.6748 (H_{650} - 87.128) + 24.423,$
Общая взвесь, мкг/л	$\rho = -0.3906 (H_{650} - 86.603) + 6.6923,$
Хлорофилл „b“, мкг/л	$X_{л „b“} = -0.1464 (H_{550} - 82.282) + 3.4994,$
Хлорофилл „a“, мкг/л	$X_{л „a“} = -0.2230 (H_{550} - 87.231) + 6.9024,$
Прозрачность по диску Секки, м	$D_c = 0.05554 (H_{550} - 86.750) + 1.6300,$
Электропроводность, мс/м	$\sigma = 0.2340 (H_{550} - 6.6560) + 11.934,$
Температура, °С	$T = -4.4307 (H_{550} - 17.280) + 81.750.$

Из анализа матрицы коэффициентов корреляции видно, что со спектральным пропусканием нефильтованной воды во всем диапазоне наилучшим образом связан общий фосфор ( $r = 81-84\%$ ). Высокая корреляция ( $r = 80\%$ ) отмечается между общей взвесью и пропусканием нефильтованной воды при  $\lambda = 650$  нм. Это подтверждает данные (Mishael, 1980) о том, что красный диапазон наиболее перспективен для изучения взвесей в воде при помощи аэрокосмических съемок. Хорошая корреляционная связь с оптическим пропусканием нефильтованной воды наблюдается также для температуры на длине волны 550 нм ( $r = 84\%$ ) и для прозрачности по диску Секки ( $r = 84\%$ ). Удовлетворительную связь с гидрооптическими показателями имеют пигменты фитопланктона хлорофилла „a“ и „b“.

Из приведенных расчетов следует, что при помощи материалов аэрокосмических съемок имеется принципиальная возможность косвенного фиксирования различных типов вод Ладожского озера по таким показателям, как общий фосфор, температура, прозрачность воды по диску Секки, электропроводность, содержание взвесей и хлорофилла „a“ и „b“.

## Л и т е р а т у р а

- Г о л у б и ц к и й Б.М., Л е в и н И.М., Д а к т а ш е в М.В.  
Коэффициент яркости полубесконечного слоя морских вод. - Изв.  
АН СССР. ФАО, 1974, т. 10, № 11, с. 1235-1238.
- Л и с и ц ы н А.П. Методы сбора и исследования водной взвеси  
для геологических целей. - Тр. Ин-та океанол. АН СССР, 1956,  
т. 19, с. 17-35.
- М а т е м а т и ч е с к о е обеспечение ЕС ЭВМ. Минск, 1973,  
вып. 3.
- Р у к о в о д с т в о по методам гидробиологического анализа  
поверхностных вод и донных отложений. Л., 1983. 267 с.
- У н и ф и ц и р о в а н н ы е методы исследования качества вод.  
М., 1977, ч. 1. 116 с.
- M i c h a e l S. Remote sensing of particulate con-  
centrations in water. - Appl. Opt., 1980, vol. 19,  
N 15/16, p. 2794-2800.

Л.А. Шляхова (ГХИ),

С.Л. Ощепков (Институт физики АН БССР)

### О ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ВЗВЕСИ В ОЛИГОТРОФНЫХ ВОДОЕМАХ ПО СПЕКТРАМ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА

Как известно, экспериментальные данные о первичных гидрооптических характеристиках, формируемых процессами рассеяния и поглощения света оптически активными компонентами водной среды, могут быть использованы для получения информации о содержащихся в воде взвешенных частицах. Это составляет предмет обратных задач оптики дисперсных сред. В настоящее время подобного рода задачи достаточно хорошо изучены при интерпретации индикатрис рассеяния (Шифрин, 1983). При использовании углового распределения интенсивности рассеянного излучения удается разделить „зоны влияния” мелких минеральных и крупных биологических частиц в ходе решения обратной задачи и свести к минимуму учет факторов, связанных с наличием в воде органических растворенных веществ. К сожалению, подобные измерения в натуральных условиях представляются относительно сложными, а определение показателя направленного рассеяния в абсолютных единицах обычно проводится с большой погрешностью. В этом отношении спектральные измерения показателя ослабления света характеризуются относительной простотой и надежностью. Оценки границ применимости метода спектральной прозрачности, приведенные в работах (например, Шифрин, Перельман, 1963), свидетельствуют о весьма низкой информативности метода применительно к обратным задачам гидрозольного рассеяния при измерении ослабления света в видимой области длин волн. Однако этот результат частично может быть связан с формальным отсут-

вием априорных ограничений метода на искомую функцию распределения частиц по размерам, что, с одной стороны, делает метод более универсальным, а с другой — при измерении прозрачности требует значительного расширения спектрального диапазона в УФ-область.

В настоящей работе в рамках метода модельных оценок, предполагающего параметризацию спектра размеров рассеивающих частиц, исследуются точностные характеристики восстановления степени дисперсности и концентрации минеральной составляющей взвеси по показателю ослабления света в видимой области спектра. Приводятся результаты обработки спектров прозрачности, измеренных в период комплексных гидрооптических экспериментов 1980 г. в олиготрофных водах оз. Байкал.<sup>1</sup>

### Априорные ограничения

При доопределении обратной задачи светорассеяния на основании ранее развитых положений и прямых визуально-микроскопических исследований использовано однокомпонентное приближение. Считалось, что для района селенгинского мелководья, где проводились натурные измерения, характерно присутствие мелкодисперсной фракции взвеси с преобладанием частиц глинистого минерала монтмориллонита: эффективный диаметр частиц  $2r < 5$  мкм; относительный показатель преломления  $n = 1.15$ ; плотность  $d = 2$  г/см<sup>3</sup> (Зюлькина, 1975); спектр размеров частиц описывается распределением типа Юнга  $\varphi(r) \sim r^{-\nu}$  в интервале размеров от 0,02 до 2 мкм. Для расчета модельных спектров ослабления  $\epsilon(\lambda)$  использовалось приближение сферических частиц с привлечением формул дифракционной теории Ми. Вычисление полидисперсных интегралов проводилось с шагом  $\Delta r = 0.02$  мкм и нормировкой функции распределения на единичную объемную концентрацию частиц  $C_V$ . Выполненные необходимые предельные оценки показали, что в видимой области спектра значения показателя ослабления света при равной объемной концентрации частиц в среднем в 10 раз выше минеральной фракции по сравнению с крупнодисперсной биологической (во втором случае брались логнормальные функции со средним радиусом частиц  $> 7$  мкм и  $\hat{m} = 1.05 - i10^{-3}$ ).

В соответствии с изложенным исследовалась двухпараметрическая обратная задача по восстановлению параметров  $\nu$  и  $C_V$  (или  $C_d = d \cdot C_V$ ).

### Точностные характеристики обратной задачи

При наличии спектральных измерений  $\epsilon^*(\lambda_j)$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) метод модельных оценок предполагает минимизацию среднеквадратического отклонения

<sup>1</sup> Спектры ослабления света измерены прозрачномером, разработанным в Лимнологическом институте СО АН СССР, и представлены авторам П.П. Шерстянкиным.

$$M^2(\nu, C_V) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{\langle \Delta^2 \epsilon(\lambda_j) \rangle} [\epsilon^*(\lambda_j) - \epsilon(\lambda_j, \nu, C_V)]^2 \quad (1)$$

по параметрам  $\nu$  и  $C_V$ . В (1)  $\langle \Delta^2 \epsilon(\lambda_j) \rangle$  — дисперсия ошибки измерения  $\epsilon^*(\lambda_j)$ . Ключевым моментом при решении данной задачи является степень влияния ошибок измерения  $\epsilon^*(\lambda_j)$  на точность восстановления параметров  $\nu$  и  $C_V$ , которая может быть оценена с помощью соответствующих коэффициентов  $\tilde{\delta}\nu$  и  $\tilde{\delta}C_V$ . При условии равенства относительных ошибок измерения  $\epsilon^*$  по спектру они определяются как коэффициенты пропорциональности между этими ошибками и относительными погрешностями восстановления параметров из (1):

$$\frac{\sqrt{\langle \Delta^2 \nu \rangle}}{\nu} = \tilde{\delta}\nu \frac{\sqrt{\langle \Delta^2 \epsilon \rangle}}{\epsilon}, \quad \frac{\sqrt{\langle \Delta^2 C_V \rangle}}{C_V} = \tilde{\delta}C_V \frac{\sqrt{\langle \Delta^2 \epsilon \rangle}}{\epsilon}. \quad (2)$$

Естественно, чем меньше  $\tilde{\delta}\nu$  и  $\tilde{\delta}C_V$ , тем информативней спектральные измерения ослабления при решении обратной задачи. Методика расчета этих коэффициентов приведена в работе С.Л. Ощепкова (1982).

Результаты расчета точностных характеристик восстановления параметров  $\nu$  и  $C_V$  по спектрам показателя ослабления света на различных длинах волн приведены в табл. 1. Эти данные показывают, что для относительно «крутых» функций распределений частиц по размерам ( $\nu \geq 3.5$ ) с большей точностью можно восстановить параметр  $\nu$ . Наоборот, при  $\nu \leq 3.5$  с меньшей ошибкой восстанавливается концентрация рассеивающих частиц. Это объясняется уменьшением влияния вариаций степени дисперсности взвеси на спектральный ход показателя ослабления света в видимой области длин волн с возрастанием доли более крупных частиц. При отсутствии измерений прозрачности в фиолетовой или красной областях спектра, как видно из табл. 1, ошибки определения искомого параметра возрастают приблизительно в 1.5–2 раза. Первая из этих ситуаций характерна тем, что при интерпретации спектров ослабления света отпадает необходимость введения априорной информации об ослаблении света чистой водой и растворенными органическими веществами в фиолетовой области спектра, где имеющиеся в литературе данные о показателе поглощения весьма противоречивы. При использовании измерений прозрачности в области длин волн от 400 до 680 нм относительные ошибки определения концентрации не более чем в 5, а ошибки определения  $\nu$  не более чем в 2 раза превосходят погрешность измерения показателя ослабления света.

#### Интерпретация натуральных измерений

При обращении экспериментальных спектров ослабления вычиталось спектральное ослабление света собственно водой как дисперси-

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов усиления в соотношениях (2) при одновременном определении параметров  $\nu$  и  $C_d$  по показателю ослабления света для различных наборов длин волн

Характеристики	$\nu$					
	2,5	3	3,5	4	4,5	5
По $\varepsilon(\lambda)$ для $\lambda_i = 400, 420, 480, 520, 560, 580, 620, 680$ нм						
$\frac{\partial \nu}{\partial C_d}$	2.0	1.3	0.9	0.7	0.7	0.8
$\frac{\partial C_d}{\partial \nu}$	1.0	0.5	0.7	2.0	3.2	4.7
По $\varepsilon(\lambda)$ для $\lambda_i = 480, 520, 560, 580, 620, 680$ нм						
$\frac{\partial \nu}{\partial C_d}$	3.2	2.1	1.5	1.2	1.2	1.6
$\frac{\partial C_d}{\partial \nu}$	1.3	0.5	1.4	3.6	6.0	9.2
По $\varepsilon(\lambda)$ для $\lambda_i = 400, 420, 480, 520, 560, 580$ нм						
$\frac{\partial \nu}{\partial C_d}$	3.3	1.9	1.4	1.0	0.9	1.0
$\frac{\partial C_d}{\partial \nu}$	1.8	0.8	0.9	2.7	4.4	5.6
По $\varepsilon(\lambda)$ для $\lambda_i = 420, 480, 560, 580$ нм						
$\frac{\partial \nu}{\partial C_d}$	4.2	2.5	1.8	1.4	1.2	1.6
$\frac{\partial C_d}{\partial \nu}$	2.2	0.9	1.2	3.6	6.0	8.7

онной средой ( $\bar{\varepsilon}^*(\lambda) = \varepsilon^*(\lambda) - \varepsilon^B(\lambda)$ ) и использовался упрощенный, практически эквивалентный (1) двухэтапный алгоритм решения обратной задачи. На первом этапе путем минимизации величины

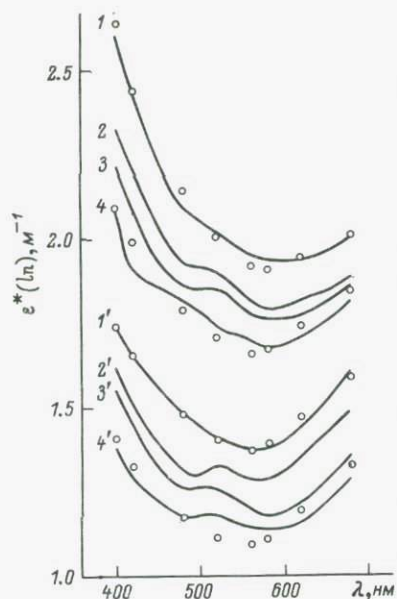
$$L^2(\nu) = \sum_{j=1}^m \left[ \ln \frac{\bar{\varepsilon}^*(\lambda_j)}{\langle \bar{\varepsilon}^* \rangle} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_j, \nu, 1)}{\langle \varepsilon(\nu, 1) \rangle} \right]^2 \quad (3)$$

определялся параметр  $\nu^*$ . Концентрация частиц находилась из соотношения

$$C_V = \frac{\langle \bar{\varepsilon}^* \rangle}{\langle \varepsilon \rangle} \equiv \sqrt[m]{\frac{\prod_{j=1}^m \bar{\varepsilon}^*(\lambda_j)}{\prod_{j=1}^m \varepsilon(\lambda_j, \nu^*, 1)}} \quad (4)$$

Спектральные зависимости показателя ослабления света.

Кривые — экспериментальные значения, точки — расчетные.



Результаты восстановления параметров и их ошибки, согласно соотношениям (2) при  $\frac{\sqrt{\langle \Delta^2 \epsilon \rangle}}{\epsilon} = 10\%$ , приведены в табл. 2.

Выбор экспериментальных спектров ослабления света (рисунок) определялся относительно высоким градиентом содержания и мощным выносом взвешенных веществ в исследуемом районе. Кривые 1, 2, 1', 2' и 3, 4, 3', 4' (рисунок) получены для двух разрезов селенгинского мелководья по мере удаления от дельты р. Селенги в поверхностном

слое на глубине 0,5 м (1-4) и на горизонте 25 м (1'-4'). Решение обратной задачи осуществлено для двух спектральных диапазонов: от 400 до 680 нм и от 480 до 680 нм. При определении ослабления света собственно взвесью рассмотрены два вида спектров поглощения света собственно водой. Первый из них брался для чистой воды по данным двух работ (Darsey, 1968; Tam, Patel, 1979). Во втором случае рассматривался спектр поглощения с учетом процентного вклада пигментов, желтого вещества и чистой воды для поверхностных олиготрофных вод по данным работы Копелевича, Буренкова (1977). Результаты восстановления искомым параметров для этих двух ситуаций представлены соответственно в строках А и Б табл. 2. Основная разница в результатах интерпретации  $\epsilon(\lambda)$  во всем видимом диапазоне длин волн для этих ситуаций состоит в том, что во втором случае восстановленные значения  $\epsilon$  в среднем на единицу меньше. Заметим, что во втором случае относительная среднеквадратическая погрешность  $E$  аппроксимации экспериментальных спектров расчетными больше и достигает 10% (табл. 2). К сожалению, из-за наличия ошибок в оптических измерениях такой разницы недостаточно, чтобы отдать предпочтение случаю А. Однако результаты восстановления параметров по спектрам ослабления света в области  $\lambda = 480-680$  нм, где вклад пигментов и желтого вещества в поглощение света значительно меньше, практически совпадают между собой для двух исследуемых спектров поглощения, а погрешность восстановления параметров можно признать удовлетворительной. Результаты определения концентрации в целом согласуются с данными, полученными весовым методом  $C_d^*$  (табл. 2).

Таблица 2

Результаты восстановления параметров  $\nu$  и  $C_d$  по спектральным зависимостям показателя ослабления, приведенным на рисунке

Характеристики	Номер кривой на рисунке								
	1	2	3	4	1'	2'	3'	4'	
	$C_d^*$ , мг/л								
	1,9	-	-	-	-	1,1	0,6	-	
По $\epsilon^*(\lambda)$ для $\lambda_i=400, 420, 480, 520, 560, 580, 620, 680$ нм									
А	$E, \%$	1	2	2	3	1	2	3	4
	$\nu^*$	3,7	3,6	3,5	3,4	3,5	3,5	3,8	3,6
	$\sqrt{\langle \Delta^2 \nu \rangle}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	$C_d, \text{мг/л}$	2,3	2,0	1,9	1,8	1,5	1,3	1,4	1,2
Б	$\sqrt{\langle \Delta^2 C_d \rangle}, \text{мг/л}$	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
	$E, \%$	3	4	5	7	7	6	8	10
	$\nu^*$	3,3	3,1	3,0	2,8	2,6	2,6	2,9	2,6
	$C_d, \text{мг/л}$	2,0	1,8	1,8	1,7	1,5	1,3	1,1	1,1
По $\epsilon^*(\lambda)$ для $\lambda_i=480, 520, 560, 580, 620, 680$ нм									
А	$E, \%$	1	2	2	1	1	2	2	3
	$\nu^*$	3,7	3,7	3,6	3,7	3,5	3,5	3,9	3,9
	$\sqrt{\langle \Delta^2 \nu \rangle}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$C_d, \text{мг/л}$	2,2	2,1	2,0	2,0	1,5	1,3	1,5	1,5
Б	$\sqrt{\langle \Delta^2 C_d \rangle}, \text{мг/л}$	0,5	0,4	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,5
	$E, \%$	2	2	3	2	4	3	4	4
	$\nu^*$	3,6	3,6	3,6	3,6	3,3	3,3	3,8	3,8
	$C_d, \text{мг/л}$	2,1	2,0	1,9	1,9	1,4	1,3	1,4	1,3

Таким образом, данные о показателе ослабления света в видимой области спектра весьма эффективно можно использовать для определения степени дисперсности и концентрации минеральной составляющей взвеси в олиготрофных водоемах.

### Л и т е р а т у р а

- З ю л ь к и н а В.Я. Значение взвешенных наносов в самоочищении вод р. Селенги от фенолов и нефтепродуктов: Автореф. канд. дис. Иркутск, 1975. 12 с.
- К о п е л е в и ч О.В., Б у р е н к о в В.И. О связи между спектральными значениями показателей поглощения света морской водой, пигментами фитопланктона, желтым веществом. - Океанология, 1977, т. 17, вып. 3, с. 427-433.
- О щ е п к о в С.Л. Метод параметризации в задаче восстановления микроструктуры водонефтяных эмульсий по данным об индикатрисе рассеяния. - Журн. прикл. спектроск., 1982, т. 37, № 1, с. 149-158.
- Ш и ф р и н К.С. Введение в оптику океана. Л., 1983. 278 с.
- Ш и ф р и н К.С., П е р е л ь м а н А.Я. Определение спектра частиц дисперсной системы по данным о ее прозрачности. - ДАН СССР, 1963, т. 151, с. 326-329.
- D o r s e y N.E. Properties of ordinary water substance. New York, 1968. 673 p.
- T a m A.C., P a t e l C.K. Optical absorptions of light and heavy water. - Appl. Opt., 1979, vol. 18, N 19, p. 3348-3358.

Г.А. Лахтанов, В.Е. Чуров, А.П. Пиотровская (ЛГУ)

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ ПО СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВОСХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для определения концентрации взвешенных веществ в поверхностном слое воды дистанционным методом используются характеристики поля яркости восходящего излучения: величина отраженной солнечной радиации, коэффициент отражения (Ritchie et al., 1974, 1976), коэффициент спектральной яркости (Шевченко, Шляхова, 1983), которые имеют хорошую корреляционную связь с содержанием взвеси в воде. Однако хорошие результаты при использовании этих характеристик достигаются при измерениях в условиях ясного неба или небольшой облачности и относительно спокойной водной поверхности. К тому же различные объекты, например взвесь определенной концентрации и нефтяная пленка, могут обладать одинаковыми или близкими яркостными характеристиками, что затрудняет их различение. Для проведения оперативных работ по контролю за состоянием водных бассейнов с борта судов и низколетящих самолетов

и вертолетов необходимо иметь средства и методики, позволяющие получать надежные результаты при различных облачности (в том числе и при сплошной) и волнении водной поверхности. С этой целью нами была исследована возможность использования спектрополяризационных характеристик восходящего излучения для определения концентрации взвеси.

Степень поляризации восходящего излучения может быть представлена как

$$P^2 = \left[ \frac{P_s I_s + P_i I_i}{I_s + I_i} \right]^2 - \frac{4 I_s I_i P_s P_i \sin^2 \Delta \varphi}{(I_s + I_i)^2}, \quad \Delta \varphi \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right],$$

где  $P_s, P_i$  — степени поляризации компонент излучения, отраженной от поверхности и рассеянной назад из толщи воды соответственно;  $I_s, I_i$  — интенсивности тех же компонент излучения;  $\Delta \varphi$  — разность углов поворота плоскостей поляризации тех же компонент.

Информацию о наличии взвеси несет компонента излучения, рассеянная назад из толщи воды. В первом приближении ее можно считать полностью диффузной и неполяризованной (Ерлов, 1980). При увеличении концентрации взвеси возрастает интенсивность рассеянной назад компоненты, которая будет оказывать деполяризующее действие в общем потоке восходящего излучения.

Чтобы изучить возможности поляризационного метода в определении концентрации взвеси и определить наиболее информативные условия измерений, исследования были выполнены в три этапа.

На первом этапе в лабораторных условиях изучалась угловая структура поляризации излучения, рассеянного назад в плоскости, содержащей падающие лучи и перпендикуляр к поверхности, при различной концентрации взвешенных частиц. На втором этапе с борта вертолета исследовалась азимутальная зависимость степени поляризации восходящего излучения от концентрации взвеси и условий освещенности. На третьем этапе при измерениях с борта судна определялись количественные зависимости между степенью поляризации излучения и концентрацией взвеси.

Лабораторный эксперимент выполнялся на установке, описанной в работе Бузникова и др. (1977). Исследуемое вещество — дистиллированная вода, содержащая в различной концентрации частицы латекса диаметром 0,21 мкм, — помещалось в ванну размером 500x320x210 мм. Дно и стенки ванны покрывались черной матовой краской. Измерения проводились в диапазоне длин волн 470–740 нм при различных углах освещения  $\theta_0$  и визирования  $\theta$ . На рис. 1 показаны результаты для  $\lambda = 642$  нм и  $\theta_0 = 53^\circ$ . Такие же зависимости получены и для других длин волн и углов освещения. Анализ полученных результатов показывает, что при изменении концентрации частиц латекса наибольшее изменение степени поляризации наблюдается при  $\theta > 30^\circ$ , за исключением углов визирования, близких к углу Брюстера. В последнем случае степень поляризации при любой концентрации взвеси будет около 100%. При концентрации частиц латекса до 80 мг/л наблюдается примерно линейная зависи-

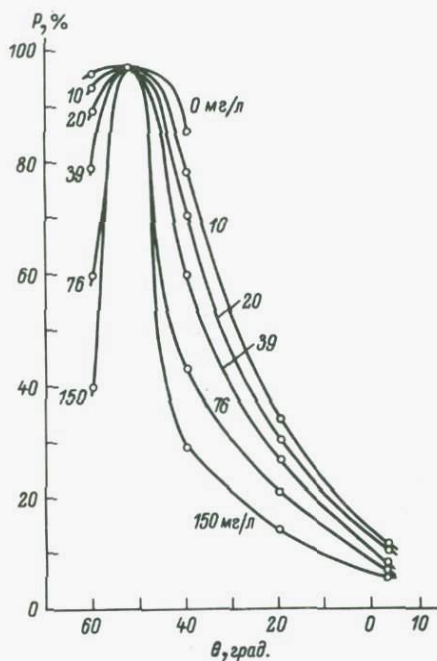


Рис. 1. Зависимости степени поляризации восходящего излучения от угла визирования при различной концентрации частиц латекса.

$\lambda = 642 \text{ нм}$ ,  $\theta_0 = 53^\circ$ ; углы визирования слева от нуля относятся к азимуту  $0^\circ$ , справа — к азимуту  $180^\circ$ .

мость между величинами степени поляризации и концентрации. Данные о наиболее информативных углах визирования, полученные в лабораторном эксперименте, были использованы в натурных исследованиях.

Изучение поляризации восходящего излучения в натуральных условиях с борта вертолета проводилось на акватории Каспийского моря близ устья р. Куры. В качестве измерительного прибора использовался бортовой поляриметр, описанный в работе Бузника и др. (1980). Визирование водной поверхности осуществлялось под углом  $45^\circ$  с высоты 200 м в пределах азимутальных углов  $0-360^\circ$ . На рис. 2 представлены диаграммы степени поляризации на четырех длинах волн, полученные при ясном небе и штиле, а также при сплошной облачности и скорости ветра 7 м/с (сведения о высоте волн отсутствуют) на участках моря с различной концентрацией взвешенных веществ. Относительная погрешность измерения степени поляризации 10–15%. Полученные данные свидетельствуют, что при увеличении концентрации взвеси в поверхностном слое воды степень поляризации уменьшается по всем азимутам. При сплошной облачности величина уменьшения степени поляризации мало зависит от азимута; при ясном небе существует ярко выраженная зависимость такого уменьшения от азимута и наилучшим направлением визирования является направление в переднюю полусферу (относительно Солнца) из-за больших значений степени поляризации восходящего излучения и достаточно высокого их различия на участках поверхности с различной концентрацией взвеси.

Определение количественных зависимостей между степенью поляризации восходящего излучения и концентрацией взвеси при различных гидрометеорологических условиях проводилось по данным, полученным на акватории Ладожского озера, рр. Волхов и Сясь с борта научно-исследовательского судна. Дистанционные измерения степени поля-

ризации восходящего излучения и концентрацией взвеси при различных гидрометеорологических условиях проводилось по данным, полученным на акватории Ладожского озера, рр. Волхов и Сясь с борта научно-исследовательского судна. Дистанционные измерения степени поля-

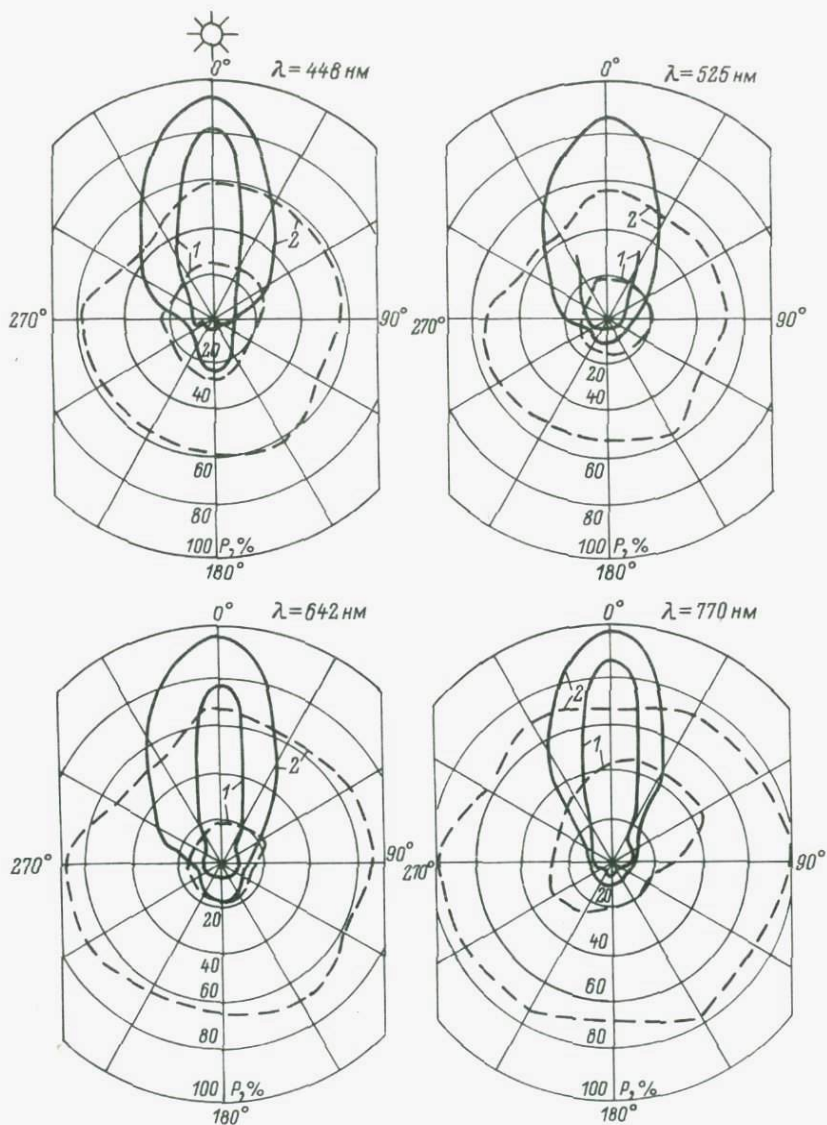


Рис. 2. Полярные диаграммы степени поляризации при угле визирования  $\theta = 45^\circ$ , полученные в условиях ясного неба и штиля (сплошные линии) и при сплошной облачности и скорости ветра 7 м/с (штриховые линии) при средней концентрации взвеси в поверхностном слое воды 25 (1) и 5 мг/л (2).

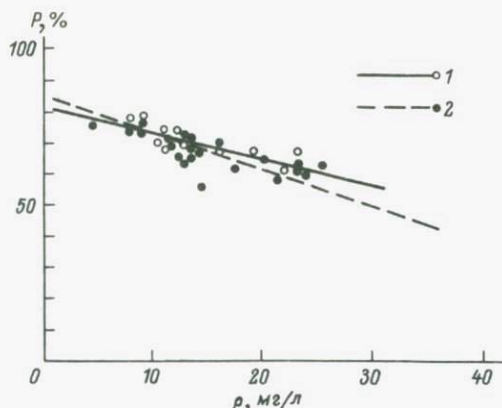


Рис. 3. Линии регрессии, рассчитанные по данным, полученным в условиях значительной (10/6=8/5 баллов) облачности (1) и сплошной (2).

ризации выполнялись одновременно с отбором проб воды для лабораторного анализа с целью определения концентрации взвеси весовым методом. Визирование водной поверхности осуществлялось в переднюю полусферу на азимутальных углах относительно плоскости солнечного вертикала  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  при угле визирования относительно надира равном  $45^\circ$ . Проведенный корреляционный анализ данных показал, что наилучшая корреляция между степенью поляризации восходящего излучения и общей концентрацией взвеси наблюдается в диапазоне длин волн  $600-800$  нм. При этом наилучшим азимутом для измерения при ясном небе и переменной облачности является азимут  $30^\circ$  (или  $330^\circ$ ); при сплошной облачности выбор азимута значения не имеет. При указанных условиях измерения, зенитных расстояниях Солнца не более  $60^\circ$  и высоте волн до  $1$  м величина коэффициента корреляции находилась в пределах  $0,7-0,8$ ; по знаку коэффициент корреляции отрицательный. Его достаточно высокая величина, небольшой разброс при длине волн  $600-800$  нм и азимуте  $30^\circ$  обусловлены в значительной степени тем, что свет неба, дающий большой вклад в „мешающую“ компоненту восходящего излучения, отраженную от водной поверхности, имеет в длинноволновой части видимого диапазона спектра меньшую яркость, а на отмеченном азимуте — меньшую степень поляризации по сравнению с другими азимутами.

На рис. 3 показаны линии регрессии, соответствующие уравнениям регрессии типа  $\rho = \hat{a} + \hat{b}P$ , рассчитанные по данным, полученным в условиях значительной (10/6=8/5 баллов) и сплошной облачности. В первом случае азимутальный угол визирования равнялся  $30^\circ$ , во втором имел произвольное значение. Близкие значения к отмеченным выше коэффициентам корреляции имели коэффициенты для неорганической взвеси ( $0,5-0,7$ ). По-видимому, именно эта взвесь вносила

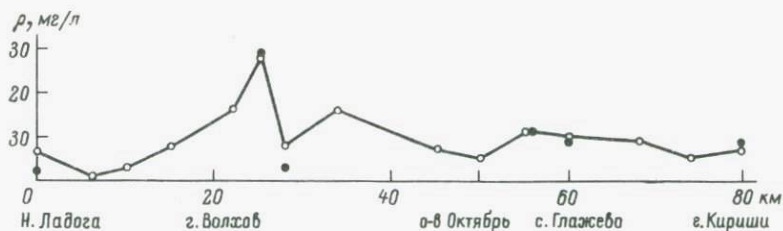


Рис. 4. Распределение взвешенных веществ на р. Волхов I-VII 81.

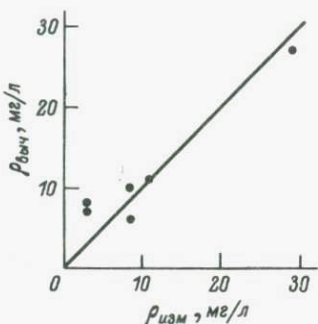
Рис. 5. График связи измеренных и рассчитанных концентраций взвеси.

основной вклад в полученные зависимости, так как в подавляющем большинстве случаев концентрация неорганической взвеси была гораздо выше, чем органической. При этом надо иметь в виду, что при фильтрации частицы взвеси размером меньше 0,75–0,85 мкм могли проходить через фильтр, и поэтому концентрация неорганической взвеси могла быть определена в заведомо заниженных количествах по сравнению с органической, имеющей более крупные размеры.

Таким образом, в результате выполненных исследований было установлено, что существует устойчивая корреляция между степенью поляризации восходящего излучения и общей концентрацией взвеси при различных гидрометеорологических условиях. Эта корреляция может быть использована на практике для измерения концентрации взвеси в природных водах с помощью соответствующей аппаратуры.

В качестве примера практического использования разработанной методики на рис. 4 представлены данные о распределении взвешенных веществ в р. Волхов от устья до г. Кириши, полученные 1 июля 1981 г. Измерения были выполнены в условиях сплошной облачности. По измеренным величинам степени поляризации с помощью уравнения регрессии определены величины общей концентрации взвеси в поверхностном слое воды. На рис. 5 сравниваются концентрации, рассчитанные по уравнению регрессии и определенные путем анализа проб, взятых на 6 станциях (черные кружки на рис. 4 и 5). Уравнение регрессии получено независимо от анализа этих проб. Наибольшее различие в приведенных данных составляет 5 мг/л.

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения изучения поступления взвешенных веществ в речной сток, влияния поставки питательных веществ речным стоком на биопродуктивность Ладожского озера.



## Л и т е р а т у р а

- Б у з н и к о в А.А., Л а х т а н о в Г.А., К у з н е ц о в А.Н.  
Бортовой поляриметр для дистанционной индикации нефтяных загрязнений на поверхности моря. — В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов: Тез. докл. VII Пленума рабочей группы по оптике океана. Таллин, 1980, с. 268–272.
- Б у з н и к о в А.А., Л а х т а н о в Г.А., Ч у р о в В.Е.  
О применении поляризационного метода дистанционной индикации влажности почвы. — Вод. ресурсы, 1977, № 5, с. 173–179.
- Е р л о в Н.Г. Оптика моря. Л., 1980. 248 с.
- Ш е в ч е н к о Ю.А., Ш л я х о в а Л.А. Определение концентрации минеральной взвеси в природном водоеме по спектру выходящего излучения. — Исследование Земли из космоса, 1983, № 6, с. 22–27.
- R i t c h i e J.C., M c H e n r y J.R., S c h i e b e F.R., W i l s o n R.B. The relationship of reflected solar radiation and the concentration of sediment in surface water of reservoirs. — Remote Sensing of Earth Resources, 1974, vol. 3, p. 57–72.
- R i t c h i e J.C., S c h i e b e F.R., M c H e n r y J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. — Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1976, vol. 42, N 12, p. 1539–1545.

К.Я. Кондратьев, Д.В. Поздняков

### ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОЕМАХ

В океанологической и лимнологической практике исследование процессов эвтрофирования природных вод в значительной мере опирается на изучение тенденций изменения численности и видового состава фитопланктона (ФП) как основного индикатора биологической продуктивности водоемов (Антропогенное эвтрофирование..., 1982). При этом в качестве общепринятой и отработанной методической основы изучения ФП вплоть до настоящего времени выступают измерения *in situ*. Между тем результаты теоретических разработок и статистически достоверные экспериментальные данные (см., например, Wroblewski, O'Brien, 1976; Denman, 1977; Jones, Francis, 1982) свидетельствуют о весьма значительных пространственно-временных вариациях распределения ФП (имеются в виду распределения численной и весовой концентрации, а также флористической принадлежности ФП). Так, в озерах характерные масштабы изменчивости распределений ФП варьируют (для размерностей

см и мин) от 1 до  $10^6$  (Jones, Francis, 1982). Отсюда следует, что контактные точечные измерения *in situ* с судов (помимо прочих присущих им недостатков) часто могут быть нерепрезентативными (Арст, Каск, Соомер, 1983). Это обстоятельство естественным образом объясняет все возрастающее внимание к разработке и внедрению дистанционных методов индикации, обладающих преимуществами оперативности и естественного пространственного осреднения.

В связи с этим интересно рассмотреть принципиальные основы физических подходов к решению задачи восстановления содержания в воде хлорофилла "а" ( $Хл_a$ ). Как известно (Винберг, 1957), по данным дистанционных измерений световых сигналов, поступающих от водной поверхности,  $Хл_a$  может быть принят в качестве индикатора биомассы ФП.

Радиометр, расположенный над водой и направленный к ее поверхности, воспринимает некоторый яркостный сигнал  $B_0$ , являющийся суммой сигналов, приходящих от поверхности воды и из ее толщи. Очевидно, что яркость света, диффузно отраженного водной толщей в направлении радиометра ( $B_w$ ), должна быть функционально связана с первичными гидрооптическими характеристиками водной среды. Действительно, величина  $B_w$  пропорциональна коэффициенту диффузного отражения  $R(\tau=0, \lambda)$ , который, следуя работе Гордона, Брауна и Джекобса (Gordon, Brown, Jacobs, 1975), может быть представлен как<sup>1</sup>

$$R(\tau=0, \lambda) = \sum_{n=0}^N r_n(0) \cdot \left[ \frac{(Bb)(\lambda)}{\alpha(\lambda) + (Bb)(\lambda)} \right]^n, \quad (1)$$

где  $\tau$  - оптическая плотность водной среды ( $\tau=0$  соответствует уровню, непосредственно находящемуся под поверхностью воды);  $r_n(0)$  - безразмерный коэффициент разложения  $R$  в ряд, его величина зависит от условий освещения водной поверхности Солнцем и наличия (отсутствия) облачности;  $\alpha(\lambda)$  и  $b(\lambda)$  - коэффициенты поглощения и рассеяния водной среды;  $B$  - вероятность рассеяния назад;  $N$  - число членов разложения в ряд (в данном случае равно трем).

Поскольку коэффициенты  $\alpha(\lambda)$  и  $b(\lambda)$  обладают свойством аддитивности, можно записать:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_w(\lambda) + \sum_i^k \alpha_i(\lambda), \quad (Bb)(\lambda) = (Bb)_w(\lambda) + \sum_i^k (Bb)_i(\lambda), \quad (2)$$

<sup>1</sup> Следует подчеркнуть, что существует еще ряд представлений  $R(0, \lambda)$  через первичные гидрооптические характеристики (Козлянинов, Пелевин, 1965; Preisendorfer, 1976; Morel, Prieur, 1977; Kirk, 1981), которые, однако, дают результаты, очень близкие к тем, какие получаются при использовании формулы (1).

где индекс  $\omega$  относится к воде;  $k$  — количество оптически активных компонентов в воде, которыми в водах естественных водоемов являются ФП, растворенное органическое вещество (РОВ), минеральная взвесь (МВ), органическая взвесь (ОВ, помимо ФП) и др. Если ограничиться четырьмя перечисленными компонентами и ввести удельные коэффициенты поглощения и рассеяния —  $\alpha_i^*(\lambda)$ ,  $b_i^*(\lambda)$ ,  $(Bb)_i^*(\lambda)$ , то соотношение (2) примет вид:

$$\begin{aligned} \alpha(\lambda) &= \alpha_{\omega}(\lambda) + C_1 \alpha_1^*(\lambda) + C_2 \alpha_2^*(\lambda) + C_3 \alpha_3^*(\lambda) + C_4 \alpha_4^*(\lambda), \\ (Bb)(\lambda) &= (Bb)_{\omega}(\lambda) + C_1 (Bb)_1^*(\lambda) + C_2 (Bb)_2^*(\lambda) + C_4 (Bb)_4^*(\lambda), \end{aligned} \quad (3)$$

здесь индексы  $i=1, 2, 3, 4$  означают соответственно Хл, МВ, РОВ и ОВ;  $C_i$  — концентрация оптически активного компонента.

Задача, таким образом, сводится к тому, чтобы при известных  $\alpha_i^*(\lambda)$  и  $(Bb)_i^*(\lambda)$ , а также  $\alpha_{\omega}(\lambda)$ ,  $(Bb)_{\omega}(\lambda)$ , варьируя значения  $C_i$  в пределах, которые могли бы считаться репрезентативными для естественных водоемов, проанализировать изменения спектрального распределения  $R(\lambda)$  и на этой основе попытаться сформулировать алгоритм, связывающий эти изменения с содержанием Хл, а следовательно, и ФП.

В работе Букаты, Брутана и Джерома (Bukata, Bruton, Jerome, 1983) были предприняты расчеты спектральных значений  $R(\lambda)$  для четырехкомпонентной водной среды ( $H_2O$ , МВ, ФП и РОВ). Вычисления велись по формуле (1) с коэффициентами разложения, соответствующими условиям безоблачного неба и высотам Солнца (при визировании из толщи воды)  $\leq 20^\circ$ . Концентрации компонентов варьировались в широком диапазоне значений, перекрывающем соответствующие средние величины  $\langle C_i \rangle$ , зарегистрированные измерениями *in situ* в западной части оз. Онтарио (Bukata, Bruton, Jerome et al., 1981). Как известно, традиционный подходом при решении интересующего нас типа задач является отыскание в регистрируемом спектральном распределении радиации  $R(\lambda)$  таких двух длин волн  $\lambda_i$  и  $\lambda_j$ , чтобы на одной из них, например  $\lambda_i$ , значение  $R(\lambda_i)$  определялось исключительно концентрацией искомого оптически активного компонента ( $C_x$ ), а на другой выполнялось условие  $R(\lambda_j) \neq f(C_x)$ . Результаты обсуждаемых расчетов показывают (рис. 1), что такой традиционный подход может дать адекватные результаты лишь в наиболее простых в оптическом отношении водах, практически лишенных РОВ и с  $C_{МВ} \leq 0,1$  г/м<sup>3</sup>. Действительно, в подобной ситуации с увеличением  $C_{Хл}$  монотонно (но не линейно) снижается значение  $R(430-450)$  (так называемый хлорофильный провал), в то время как при 505 нм (для  $C_{МВ} = 0$ , рис. 1, а) или 570 нм (для  $C_{МВ} = 0,1$  г/м<sup>3</sup>, рис. 1, б) имеет место равенство  $\frac{\partial R}{\partial C_{Хл}} = 0$ . Для таких условий (часто характерных для океанических вод) могут быть с успехом использованы алгорит-

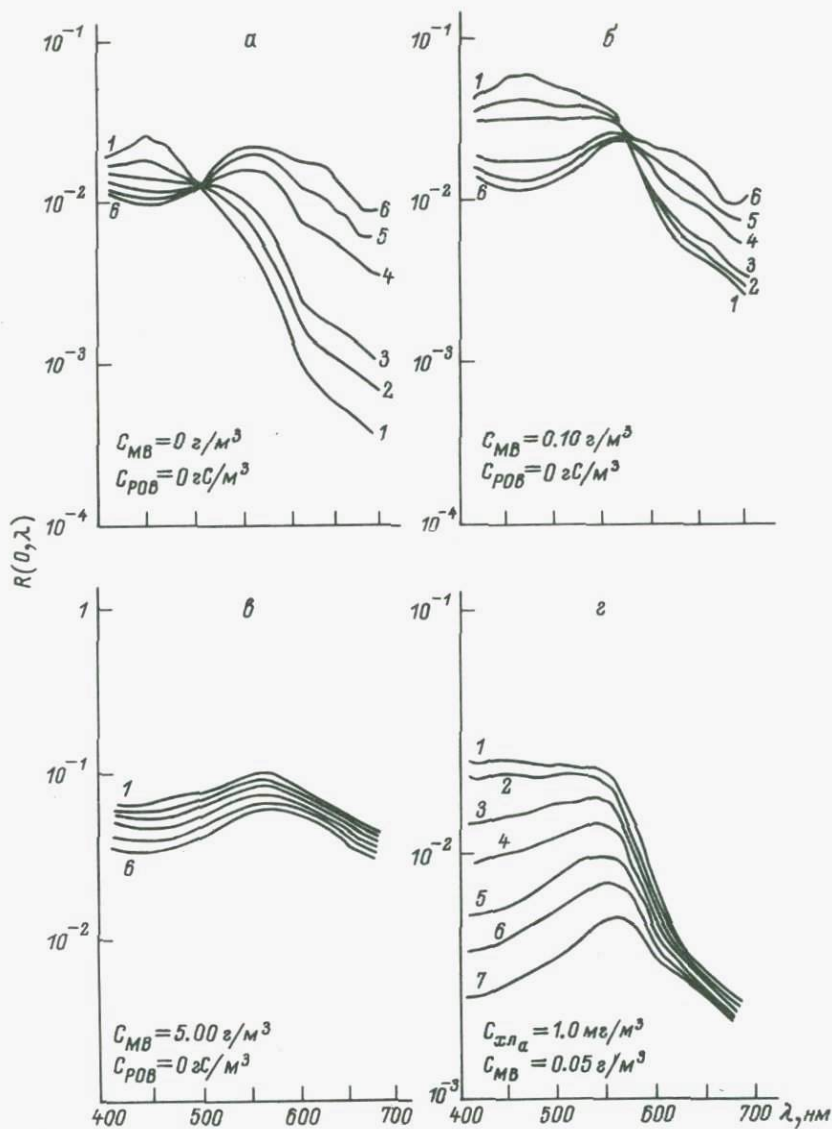


Рис. 1. Спектральные вариации коэффициента диффузного отражения  $R(0, \lambda)$  в зависимости от содержания в воде МВ, РОВ и ФП.

На рис. 1, а-в кривым 1-6 соответствуют  $C_{ХЛ_\alpha}$  0,05, 0,5, 1,00, 6,00, 10,00 и 20,00 мг/м<sup>3</sup>, на рис. 1, г кривым 1-7 соответствуют  $C_{POB}$  0, 0,10, 0,50, 1,0, 2,0, 3,0 и 5,0 г/м<sup>3</sup>.

Т а б л и ц а 1

Алгоритмы вида  $\langle C_{\text{ПИГМ}} \rangle = A [R(\lambda_i)/R(\lambda_j)]^{-B}$ ,  
предложенные различными авторами

$R(\lambda_i)/R(\lambda_j)$	A	-B	N	$r^2$	Источник
$R(443)/R(550)$	0.776	1.329	55	0.91	} Clark, 1981
$R(443)/R(520)$	0.551	1.806	55	0.87	
$R(440)/R(550)$	0.54	1.13	7	0.96	} Clark, Baker, Strong, 1980
$R(440)/R(550)$	0.505	1.269	21	0.978	
$R(440)/R(520)$	0.415	1.795	21	0.941	} Gordon, Clark, 1980a
$R(443)/R(550)$	0.783	2.12		0.94	} Smith, Wilson, 1981
$R(443)/R(520)$	2.009	5.93		0.95	
$R(443)/R(550)$	2.45	3.89	6	0.61	} Sathyendranath, Morel, 1983
$R(443)/R(550)$	1.13	1.71	454		
$R(443)/R(550)$	1.216	2.589			} Gordon, Clark, Brown et al., 1982
$R(443)/R(550)$	1.129	1.711			} Smith, Wilson, 1981
$R(443)/R(550)$					} Caraux, Austin, 1983

П р и м е ч а н и я.  $r$  — коэффициент корреляции;  $N$  — число наблюдений, по которым установлена регрессионная зависимость.

мы восстановления типа  $C_{\text{ХЛ}} = A (R(\lambda_i)/R(\lambda_j))^{-B}$ . В табл. 1 приведены конкретные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  по данным различных авторов, выработавших свои алгоритмы для ограниченных, конкретных акваторий Мирового океана.

Однако по мере увеличения  $C_{\text{МВ}}$  (при  $C_{\text{РОВ}}=0$ ) или  $C_{\text{РОВ}}$  (при  $C_{\text{МВ}}=0.05 \text{ г/м}^3$ ) в спектре  $R(\lambda)$ , во-первых, уже отсутствует такая длина волны  $\lambda_0$ , при которой  $\frac{\partial R(\lambda_0)}{\partial C_{\text{ХЛ}}} = 0$  (рис. 1, в, г),

и, во-вторых, глубина „хлорофилльного провала“ не может быть однозначно связана с  $C_{\text{ХЛ}}$ .

Таким образом, становится ясно, что для сложных в гидрооптическом отношении вод (какими, как правило, являются озерные воды) нужно искать более сложные алгоритмы восстановления  $C_{\text{ХЛ}}$ , нежели те, что представлены в табл. 1 для условий чистых океанских вод.

К такому же выводу приводит и хроматический анализ, предпринятый в рамках обсуждаемой работы (Bukata, Bruton, Jerome, 1983), если в координатной системе  $x, y$  нанести цветность воды при  $C_{Хл}$  и  $C_{МВ}$ , варьирующих от 0,05 до 20 мг/м<sup>3</sup>, при  $C_{РОВ}=0$ , используя при этом обсуждавшиеся выше спектральные значения  $R(\lambda)$ ; в итоге оказывается, что цветовые характеристики вод располагаются внутри некоторой узкой замкнутой фигуры (рис. 2, а) и для надежной цветовой индикации  $C_{Хл}$  необходима весьма высокая точность определения координаты  $y$ . При введении в эту оптическую систему  $РОВ$  ( $C_{РОВ}=2,0$  гС/м<sup>3</sup>; такое значение  $C_{РОВ}$  получено как среднее из измерений *in situ* на оз. Онтарио) фигура, образованная соответствующими локусами, такова (рис. 2, б), что возникают еще более жесткие, практически едва ли выполнимые требования к определению координаты  $y$  с целью обеспечения нужной точности восстановления  $C_{Хл}$ . Аналогичные результаты получаются и для пары координат  $y, z$  (рис. 2, в, г). Практически это означает, что при значительных концентрациях  $Хл, МВ$  и  $C_{РОВ} \geq 2,0$  гС/см<sup>3</sup> (ситуация, часто встречающаяся в озерных водах) хроматический анализ без привлечения дополнительной информации (например, о  $C_{МВ}$  и  $C_{РОВ}$  в водах, над которыми осуществляется дистанционный мониторинг) не в состоянии обеспечить удовлетворительную точность восстановления  $C_{Хл}$ .

В связи с этим интересно проследить влияние значений  $C_{РОВ}$  и  $C_{МВ}$  на зависимость координат цветности от  $C_{Хл}$ . Оказывается, что во всех случаях увеличение концентрации  $МВ$  уменьшает зависимость  $x, y, z$  от  $C_{Хл}$  и при  $C_{МВ} \geq 5,0$  г/м<sup>3</sup> все три координаты становятся практически нечувствительными к  $C_{Хл}$ . Следует добавить, что даже при незначительных величинах  $C_{МВ}$  чувствительность координат  $x, y, z$  к  $Хл$  становится весьма низкой при  $C_{Хл} > 8 \div 10$  мг/м<sup>3</sup>. Наибольшая чувствительность цветовых координат характерна для вод с относительно небольшими ( $< 3 \div 5$  мг/м<sup>3</sup>) концентрациями  $Хл$  (при  $C_{МВ} \leq 0,5$  г/м<sup>3</sup>). Это прежде всего относится к координатам  $x$  и  $z$ , координата  $y$  обнаруживает удовлетворительную чувствительность к  $Хл$  при  $C_{Хл} < 5$  мг/м<sup>3</sup>; однако восстановление  $C_{Хл}$  возможно лишь в том случае, если  $C_{РОВ}$  определена независимыми измерениями (*in situ*).

Представленные выше результаты расчетов имеют несомненный интерес, однако следует отметить их сугубо модельный характер: в качестве входных параметров авторы использовали (рис. 3) удельные коэффициенты  $a_i^*(\lambda), b_i^*(\lambda)$ , спектральные значения которых были получены осреднением и сглаживанием соответствующих экспериментально определенных величин в водах оз. Онтарио. Кроме того, на основе некоторых эмпирических данных, а также, по-видимому, в целях упрощения расчетов было принято, что вероятности рассеяния назад постоянны в видимом диапазоне спектра, а значения их равны соответственно:  $B_w = 0,500, B_{Хл} = 0,011, B_{МВ} = 0,080$ . В действительности, как свидетельствуют специальные исследования, а также анализ экспериментальных данных, полученных различными авторами, вопрос о спектральных значениях удельных коэффициентов

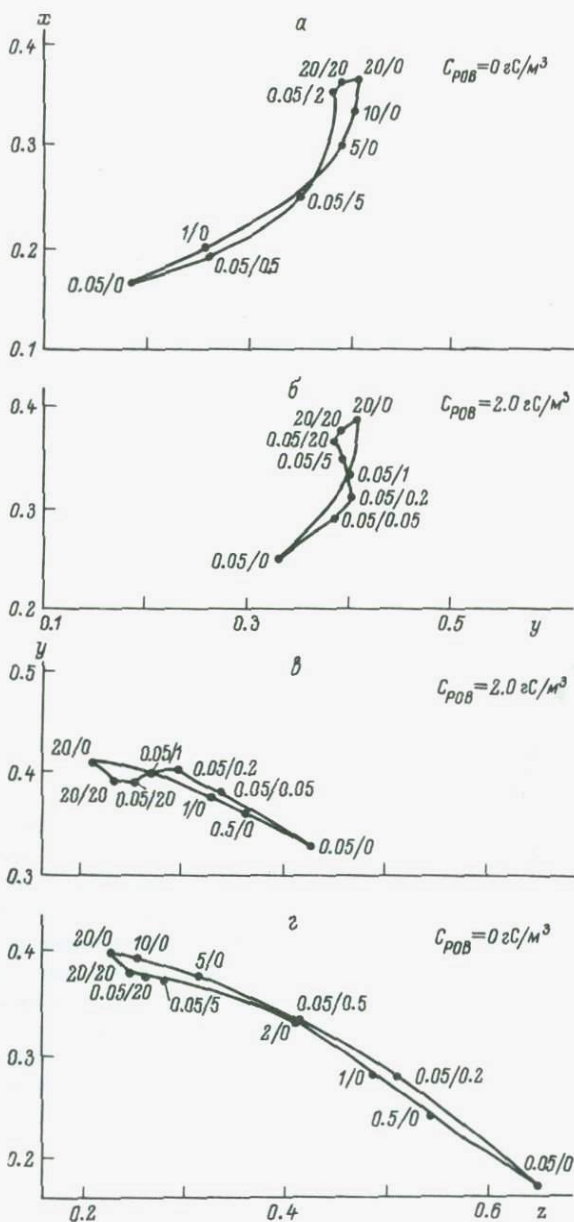


Рис. 2. Локусы зависимостей между хроматическими координатами  $x$ ,  $y$  (а, б) и  $y$ ,  $z$  (в, г).

Цифры у точек -  $C_{Xл} / C_{MВ}$ .

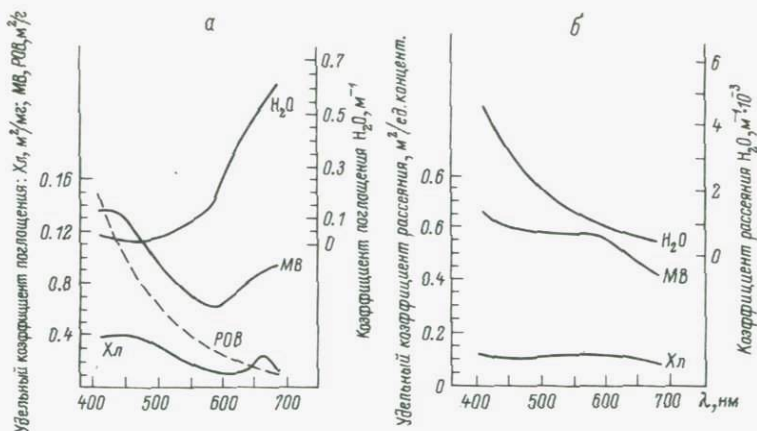


Рис. 3. Модельные спектральные зависимости удельных коэффициентов поглощения и рассеяния для МВ, РОВ и ФП, а также коэффициентов поглощения и рассеяния для чистой воды.

поглощения и рассеяния водных компонентов чрезвычайно сложны. Иллюстрацией могут служить результаты экспериментальных определений  $\alpha^*$ ,  $b^*$  и  $(Bb)$  для фитопланктона. В табл. 2 собраны значения  $\alpha_{Хл}^*(\lambda)$ , полученные авторами в разные годы, и (по крайней мере в двух случаях определенно) для различных представителей ФП.

Данные табл. 2 свидетельствуют о значительных (на некоторых длинах волн — почти на порядок величины) различиях в имеющихся оценках величины  $\alpha_{Хл}^*$ . Еще менее удовлетворительно обстоит дело с оценками (к тому же чрезвычайно малочисленными) спектральных значений  $b^*(\lambda)$ ,  $(Bb)^*(\lambda)$ . И дело здесь не только и не столько в неточностях экспериментов, сколько в объективных причинах. Действительно, разные культуры ФП характеризуются различным содержанием в их клетках универсально присутствующего агента —  $Хл_{a}$  (Трифопова, 1979; Nusch, 1980), качественным и количественным составом дополнительных пигментов ( $Хл_{b, c, d}$ , каротиноидов, фикобилинов; Хит, 1972; Баславская, 1974; Бекасова, 1975),<sup>2</sup> размерами клеток и колониальных форм (Давыдова, Петрова, 1968), относительным содержанием детрита среди живых клеток и многими другими показателями. Более того, одна и та же культура в зависимости от уровня трофики водоема, условий освещения, горизонта обитания, гидродинамических и термических условий, момента вегетационного периода и других факторов может характе-

<sup>2</sup> По данным „Оптики океана“ (1983), поглощение дополнительными пигментами может быть сравнимо с поглощением  $Хл_{a}$ .

Т а б л и ц а 2

Удельные коэффициенты поглощения ( $\text{м}^2/\text{мг}$ ) Хл по оценкам разных авторов (Bukata, Jerome, Bruton et al., 1981)

$\lambda$ , нм	А	Б	$B_1$	$B_2$	Г	Д	Е
443	0,0293	0,0253	0,056	0,031	0,082	0,0282	0,0354
520	0,0143	0,0159	0,023	0,012	0,012		0,0240
550	0,0090	0,0102	0,011	0,0074	0,007	0,0159	0,0173
670	0,0113	0,0203	0,0083	0,011	0,025		0,0086

П р и м е ч а н и е. Заглавными буквами обозначены следующие литературные источники: А - Smith, Baker, 1978; Б - Morel, Prieur, 1977;  $B_1$  - Kiefer, Olson, Wilson, 1979 (для *Thalassiosira pseudonana*);  $B_2$  - Kiefer, Olson, Wilson, 1979 (для *Monochrysis lutheri*); Г - Yentsch, 1969; Д - Doerffer, 1979; Е - Bukata, Jerome, Bruton et al., 1981.

ризоваться показателями, весьма отличными от неких „стандартных“. Совершенно очевидно, что для столь сложного гидрооптического компонента весьма затруднительно, если вообще возможно, определить универсально адекватные первичные гидрооптические характеристики. Иллюстрацией к сказанному выше может служить работа (Bricaud, Morel, Prieur, 1983), в которой исследовались нормированные (т.е. отнесенные к единице внутриклеточной концентрации Хл $_{\alpha}$ ) коэффициенты поглощения  $\tilde{\alpha}^*$ , ослабления  $\tilde{\gamma}^*$ , рассеяния  $\tilde{\beta}^*$  и рассеяния назад  $(\tilde{B}\tilde{b})^*$  для четырех культур ФП, данные о которых приведены в табл. 3.

Как видно из рис. 4, отличия в величинах нормированных коэффициентов  $\tilde{\alpha}^*$ ,  $\tilde{\beta}^*$  и  $(\tilde{B}\tilde{b})^*$  для четырех изучаемых культур ФП оказываются значительными во всем диапазоне длин волн видимого участка спектра, однако в наибольшей мере это проявляется при коротких  $\lambda$ . Опираясь на данные табл. 4, можно с уверенностью полагать, что обнаруженные отличия должны объясняться характерными размерами клеток исследовавшихся культур и присущим им сочетанием пигментов в хлоропластах. Важно также отметить явное непостоянство по спектру величины вероятности рассеяния назад  $B$  для всех четырех видов ФП (что следует из непараллельности спектральных кривых  $\tilde{\beta}^*(\lambda)$  и  $(\tilde{B}\tilde{b})^*(\lambda)$  для каждой из культур; рис. 4, б, в).<sup>3</sup> Наконец, на рис. 4 видно, что рассеяние (в том числе и рассеяние назад) такими поглощающими частицами, как клетки ФП, характеризуется отчетливой селективностью: в областях полос поглощения света пигментами наблюдается снижение величин  $\tilde{\beta}^*$  и  $(\tilde{B}\tilde{b})^*$ . Отметим, что эффект подавления рассеяния вли-

<sup>3</sup> На рис. 4, в единицы, отложенные по оси ординат, должны быть умножены на  $5 \cdot 10^2$ . Для культуры *Coccolithus huxleyi* данные отсутствуют.

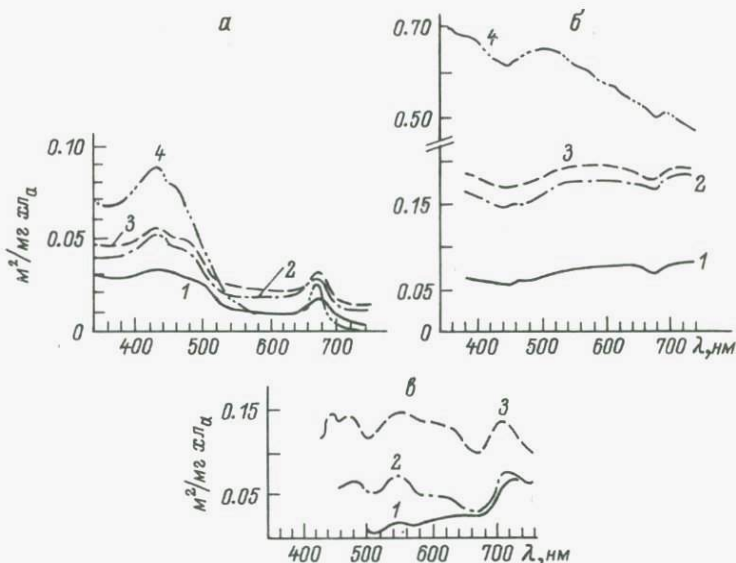


Рис. 4. Спектральные нормализованные значения коэффициентов поглощения  $\tilde{\alpha}^*$ (а), рассеяния  $\tilde{b}^*$ (б) и рассеяния назад  $(\tilde{b}_b)^*$ (в) для *Hymenomonas elongata* (1), *Tetraselmis maculata* (2), *Platymonas sp.* (3) и *Coccolithus huxleyi* (4).

зи полос поглощения был предсказан и теоретически обоснован ранее в ряде работ (Bryant, Seiber, Latimer, 1969; Gordon, 1974; Morel, Bricaud, 1981).

В свете высказанных выше общих соображений и обсуждавшихся экспериментальных данных (Bricaud, Morel, Prieur, 1983) о поглощающих и рассеивающих свойствах окрашенных клеток ФП становится очевидной исключительная сложность этого вопроса. Биоценозы естественных водоемов характеризуются, как правило, большим разнообразием форм ФП, некоторые среди них в определенный период оказываются доминирующими, чтобы затем уступить эту роль другим. Очевидно, что в такой ситуации коэффициенты  $\alpha_{ФП}^*$ ,  $b_{ФП}^*$  и  $(B_b)_{ФП}^*$  даже при соответствующих осреднениях едва ли могут считаться постоянными по времени и пространству водоема. По крайней мере этот вопрос остается открытым и требует дальнейшего изучения. Это в равной мере относится и к другим компонентам естественных вод — МВ и НОВ, характеризующимся, подобно ФП, большим разнообразием форм частиц, их химического состава и размеров, а также РОВ. И лишь только относительно  $\alpha_w$ ,  $b_w$  можно сказать, что их спектральные значения известны в настоящее время достаточно хорошо (Оптика океана, 1983).

Вернемся, однако, к вопросу обоснования алгоритма восстановления содержания хлорофилла в оптически сложных водах. Поскольку

Т а б л и ц а 3

Некоторые характеристики культур ФП, исследовавшихся в работе (Bricaud, Morel, Prieur, 1983)

Культура	Возраст, дни	Концентрация пигментов, мг/м <sup>3</sup>				Содержание феопигмента и каротиноидов (относительно суммарного содержания Хл <sub>α</sub> и Р <sub>хео</sub> <sub>α</sub> ), %		<i>d</i> , мкм	$C_i \cdot 10^{-6}$ мгХл <sub>α</sub> /м <sup>3</sup>	<i>k</i>	
		$C_{Хл_α}$	$C_{Хл_β}$	$C_{Хл_γ}$	$C_{КАРОТ}$					$\lambda=435$ нм	$\lambda=600$ нм
<i>Hymenomonas elongata</i>	19	408,5	-	56,5	523,2	6,0	120	12,0 < <i>d</i> < 15,1	2,94	0,00528	0,0009
<i>Platymonas sp.</i>	10	624,4	297,8	-	661,6	3,9	102	6,0 < <i>d</i> < 7,5	1,87	0,00392	0,0015
<i>Tetraselmis maculata</i>	4	466,5	231,2	-	434,7	0	93	7,5 < <i>d</i> < 9,5	1,62	0,00324	0,0011
<i>Coccolithus huxleyi</i>	7	89,6	-	53,4	129,2	5,8	136	3,0 < <i>d</i> < 3,8	1,14	0,00300	0,0004

П р и м е ч а н и я. *d* - средний эквивалентный диаметр клеток культуры; *k* - мнимая часть комплексного показателя преломления вещества клетки;  $C_i$  - внутриклеточная концентрация Хл<sub>α</sub>.

ные показатели поглощения, рассеяния и рассеяния назад  
ных оптически активных компонентов вод оз. Онтарио

$\alpha_{\chi_{л\alpha}}^*$ , м <sup>2</sup> /мг	$\alpha_{МВ}^*$ , м <sup>2</sup> /г	$\alpha_{H_2O+POB}^*$ , м <sup>-1</sup>	$\alpha_{HOB}^*$ , м <sup>2</sup> /г
0,0354	0,0557	0,177	0,0272
0,0240	0,0281	0,113	0,0206
0,0173	0,0188	0,122	0,00098
0,0100	0,0225	0,379	0,0

л и ц а 4 (продолжение)

$b_{\chi_{л\alpha}}^*$ , м <sup>2</sup> /мг	$b_{МВ}^*$ , м <sup>2</sup> /г	$b_{HOB}^*$ , м <sup>2</sup> /г	$b_{H_2O+POB}^*$ , м <sup>-1</sup>
0,128	0,682	0,398	0,230
0,127	0,650	0,363	0,168
0,128	0,643	0,354	0,151
0,104	0,512	0,290	0,404

л и ц а 4 (продолжение)

$(Bb)_{\chi_{л\alpha}}^*$ , м <sup>2</sup> /мг	$(Bb)_{МВ}^*$ , м <sup>2</sup> /г	$(Bb)_{HOB}^*$ , м <sup>2</sup> /г	$(Bb)_{H_2O+POB}^*$ , м <sup>-1</sup>
0,00199	0,0328	0,00900	-0,00156
0,00182	0,0474	0,00756	-0,00796
0,00241	0,0525	0,00972	-0,0128
0,00175	0,0333	0,00472	-0,00936

гидрооптической ситуации на величину  $R(0, \lambda)$  в видимом  
е спектра оказывают влияние все без исключения из упо-  
выше компонентов природных вод, отношение  $R(0, \lambda_i) /$   
; ) не может быть однозначно связано с концентрацией  $\chi_{л\alpha}$   
ает необходимость учета „вклада“ МВ, НОВ, РОВ. Иными  
речь идет об установлении столь сложных многомерных  
стей, что применение их в практике дистанционного зонди-  
становится проблематичным. В работе Букаты, Брутона,  
(Bukata, Bruton, Jerome et al., 1981) была след-  
ытка упростить задачу: основываясь на статистически зна-  
анных измерений in situ на оз. Онтарио, авторы приняли,  
 $\Delta B = 10\% C_{\chi_{л\alpha}}$ , а  $C_{POB} = 2.16 \text{ гС/м}^3$ . Для таких условий

(на основе формулы (1) и значений удельных коэффициентов поглощения и рассеяния, табл. 4, полученных экспериментально для вод того же озера) были рассчитаны зависимости отношений<sup>4</sup>  $R(0,550)/R(0,670)$ ,  $R(0,520)/R(0,670)$ ,  $R(0,443)/R(0,670)$ ,  $R(0,443)/R(0,520)$ ,  $R(0,520)/R(0,550)$  от содержания Хл и МВ ( $C_{Хл}$  и  $C_{МВ}$  варьировались соответственно в диапазонах  $0 \div \pm 20$  мг/м<sup>3</sup> и  $0-10$  г/м<sup>3</sup>). Из исследованных отношений наибольшую чувствительность к изменениям  $C_{Хл}$  (при  $C_{МВ}=0$ ) обнаружили первые три пары, хотя с увеличением  $C_{МВ}$  от 0 до 10 г/м<sup>3</sup> чувствительность к вариациям  $C_{Хл}$  падает (что находится в согласии с результатами обсуждавшихся выше модельных расчетов (Vukata, Bruton, Jerome, 1983)). Тем не менее эти три пары отношений были признаны наиболее перспективными с точки зрения дистанционной индикации Хл и для них были построены двойные изоплеты вида  $R(0, \lambda_i) = f[R(0, \lambda_j)]$  при  $C_{Хл}$  и  $C_{МВ}$ , варьирующих в указанных выше пределах. Анализ изоплет (рис. 5) показывает, что, во-первых, при одновременно малых концентрациях Хл и МВ абсолютные значения  $R(0, \lambda_i)$  и  $R(0, \lambda_j)$  не превосходят нескольких процентов и их чувствительность к изменениям  $C_{Хл}$  и  $C_{МВ}$  в этом диапазоне концентраций Хл и МВ невелика, во-вторых, из трех парных зависимостей наибольшей чувствительностью к изменениям  $C_{Хл}$  и  $C_{МВ}$  в области значений концентраций, характерных для озерных вод, обладает пара  $R(0,520)-R(0,670)$  (рис. 5, в).

Ввиду низких абсолютных значений  $R(0, \lambda)$  в водах с небольшим содержанием органической и минеральной взвесей и усиления потока диффузно рассеянной солнечной радиации замутненными водами авторы пришли к нетрадиционному заключению, что индикация Хл, равно как и МВ, по предложенной методике предпочтительна (особенно с высоколетящих носителей) в условиях мутных вод.

Сравнение измеренных *in situ*  $C_{Хл}$  со значениями  $C_{Хл}$ , восстановленными с использованием двойных изоплет (рис. 5), показало, что наилучший результат (для 5-компонентной модели вод оз. Онтарио) получен при использовании каналов 443, 520 и 670 нм (ошибка восстановления не превышала 10%). Авторы обсуждаемой работы считают, что предложенный ими алгоритм может быть использован для мониторинга большинства озерных вод; для его применения необходимо лишь задание априорных значений  $C_{РОВ}$  и  $C_{НОВ}/C_{Хл}$ , характерных для конкретного водоема. При этом имеется в виду, что удельные спектральные коэффициенты  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $(Bb)^*$ , приведенные в табл. 4, репрезентативны для широкого класса озерных вод. Разумеется, лишь экспериментальная проверка может подтвердить справедливость такого мнения.

<sup>4</sup> Выбор длин волн определялся спектральными каналами сканера цвета береговой зоны (СБЗ), установленного на борту Nimbus-7, для которого и разрабатывалась методика дистанционного восстановления Хл.

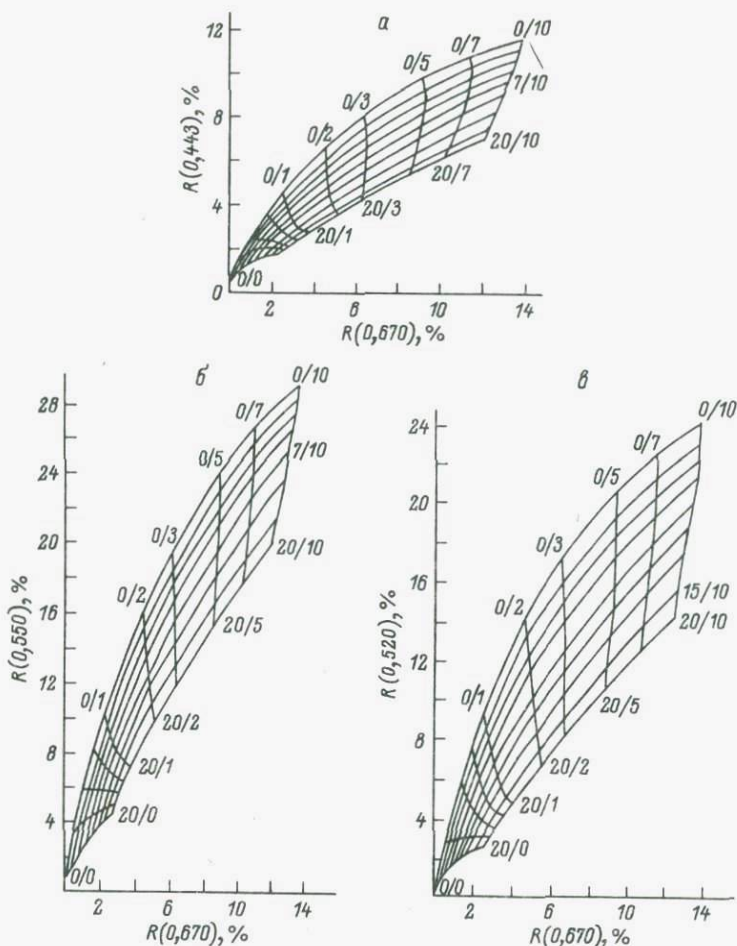


Рис. 5. Зависимости между  $R(0, 443)$  и  $R(0, 670)$  (а),  $R(0, 550)$  и  $R(0, 670)$  (б) и  $R(0, 520)$  и  $R(0, 670)$  (в) в функции концентрации  $X_{л\alpha}$  и МВ.

Первая цифра у кривых характеризует  $C_{X_{л\alpha}}$  (мг/м<sup>3</sup>), вторая —  $C_{МВ}$  (г/м<sup>3</sup>).

Рассмотренные выше подходы к созданию алгоритмов дистанционного восстановления  $X_{л}$  характеризуются существенными упрощениями истинной физической картины, реализующейся в естественных водоемах. Частично этот аспект уже затрагивался при обсуждении вопроса об удельных коэффициентах рассеяния и поглощения ФП. Помимо этого следует особо отметить, что в этих моделях не учитываются вариации концентраций основных оптически активных ком-

понентов - Хл, РОВ, МВ - по глубине водоема. Между тем измерения *in situ* свидетельствуют о том, что реальные вертикальные профили  $C_{Хл}$ , РОВ, МВ обнаруживают сложную и изменчивую структуру (Давыдова, Петрова, 1968; Jonasz, 1982; Оптика океана, 1983). Можно предположить, что как интенсивность, так и спектральный состав диффузно отраженного солнечного излучения, выходящего из водной толщи, должны зависеть не только от общего содержания компонентов, но и от их вертикальной стратификации. Имеются как косвенные (Ерлов, 1980; Motoaki, Booth, Okami, 1984), так и прямые (Fisher, Gassel, 1981; Smith, 1981) экспериментальные тому подтверждения.

Теоретическому рассмотрению этого вопроса посвящено довольно много исследований (Gordon, 1978; Gordon, Clark, 1980b; Zaneveld, 1982; Арст, Каск, Сомер, 1983; Халтурин, Толкаченко, 1983). Так, в работах Заневельда, а также Халтурина и Толкаченко (Zaneveld, 1982; Халтурин, Толкаченко, 1983) получены выражения, связывающие вертикальные распределения гидрооптических характеристик среды с  $R(0, \lambda)$ . Однако нам не известны экспериментальные работы, в которых было бы осуществлено реальное восстановление распределения концентраций оптически активных компонентов с глубиной по наблюдаемой яркости света, диффузно отраженного водной средой в атмосферу. Более того, согласно Гордону и Кларку (Gordon, Clark, 1980b), методами дистанционного зондирования концентрация распределенной по глубине компоненты  $C(z)$  может быть восстановлена лишь как некоторая средневзвешенная величина  $\bar{C}$ :

$$\bar{C} = \frac{\int_0^{z_{90}} C(z)g(z)dz}{g(z)}, \quad (4)$$

где  $g(z) = \exp(-2 \int_0^z K(z')dz')$ ;  $z_{90}$  - глубина проникновения солнечных лучей в воду при их нормальном падении на поверхность раздела вод;  $K(z)$  - вертикальный коэффициент ослабления освещенности в воде. Авторы отмечают, что, согласно (4), дистанционно найденная величина  $\bar{C}$  в значительной мере определяется концентрацией компонента в приповерхностном слое. Как нетрудно заметить, в этом вопросе еще нет достаточной ясности, поэтому предстоит дополнительные, специализированные работы как теоретического, так и практического характера.

Подытоживая сказанное выше, необходимо подчеркнуть следующие особенности методики восстановления концентрации Хл по яркости диффузно отраженного водной толщей солнечного света.

1. Методика позволяет судить лишь о концентрации Хл, а не об его флористической принадлежности (т.е. это не таксономическая методика);

2. Восстановленная таким методом  $C_{Хл}$ , хотя и является осредненной по  $Z_{90}$  величиной, однако она, по-видимому, в значительной

мере отражает  $C_{ХД}$  у поверхности водоема и пока невозможно восстановить ее вертикальный (глубинный) профиль.

3. Применение обсуждаемой методики для мониторинга сложных в оптическом отношении вод требует задания априорной информации о средних по водоему  $C_{РОВ}$  и относительной  $C_{НОВ} = \frac{C_{НОЭ}}{C_{ХД}}$ .

4. Учитывая, что для типичных гидрооптических условий в естественных водоемах величина  $R(0, \lambda)$  не превышает 10–15%, восстановление  $C_{ХД}$  по спектру диффузно отраженной толщей воды солнечной радиации предпочтительнее производить в малооблачную погоду при малых зенитных углах Солнца.<sup>5</sup>

5. Хотя расчеты поля видимого излучения, выходящего из водоема, и свидетельствуют о том, что величина  $R(0, \lambda)$  при фиксированном зенитном угле Солнца  $\theta$  существенно растет к горизонту особенно в азимутальных направлениях, близких к плоскости солнечного вертикала (см. Fisher, Koepke, 1984), однако поскольку при этом интересующая нас информация об оптически активных компонентах поступает с водных слоев, все более и более близко расположенных к поверхности, очевидно, что целесообразно поступиться энергетикой полезного сигнала ради повышения его информативности. Отсюда с необходимостью следует, что углы визирования радиометром поверхности водоема должны быть невелики.

Наконец, следует отметить, что эффективность применения обсуждаемой методики весьма существенным образом зависит от состояния поверхности: она значительно снижается при волнении (что особенно сильно проявляется при наличии „солнечной до-

<sup>5</sup> Хотя с возрастанием зенитного угла Солнца  $\theta$  величина  $R(0)$  растет (и это возрастание, согласно (Kirk, 1984), может быть параметризовано зависимостью вида  $R(0) = (0,975 - 0,629\mu_0)(Bb) \cdot \alpha^{-1}$ , где  $\mu_0$  – косинус угла падения фотонов сразу под поверхностью водоема), регистрируемая при дистанционных наблюдениях в надир яркость радиации  $B_w$ , диффузно рассеянной толщей воды, пропорциональна не только  $R(0)$ , но и суммарной освещенности сверху ( $E_0$ ) поверхности воды (Austin, 1974):

$$B_w = \frac{R(0)(1-\rho)E_0}{\pi n^2 (1-0.48R(0))}.$$

Здесь  $\rho$  – френелевский коэффициент отражения для надирного угла визирования;  $n$  – коэффициент преломления воды относительно воздуха.

Поскольку даже при отношении  $(Bb/\alpha) = 0.3$  увеличение  $R(0)$  с  $\theta$  ( $0^\circ < \theta < 50^\circ$ ) не превышает 1%, то очевидно, что зависимость  $B_w$  от  $\theta$  будет прежде всего определяться  $E_0(\theta)$ , которая для указанной в п. 4 „оптической“ погоды максимальна при малых зенитных углах Солнца (Kondratyev, 1972).

рожки"), появлении пенных образований („барашков", пенных полос), поверхностно активных пленок и т.д.

В свете сказанного возникает вопрос, не существует ли какой-либо иной, альтернативной или дополняющей первую, методики, которая позволила бы расширить возможности дистанционного зондирования ФП?

В связи с этим в последнее время все больше внимания привлекает флюоресцентный метод индикации Хл. Как известно (Хит, 1972), в структуре клеток ФП (за исключением, по-видимому, сине-зеленых<sup>6</sup>) имеются так называемые хлоропласты (ХП), представляющие собой автономные цитоплазматические тельца, в которых полностью реализуются все необходимые условия для осуществления фотосинтеза. В их состав входят белки, липиды, нуклеиновые кислоты, пигменты, минеральные соединения и некоторые другие вещества. Внутри ХП находится бесцветная белковая строма (матрикс), в которую погружены ламеллярные системы, содержащие пигменты. Основу пигментных систем (ПС) составляют хлорофиллы (Хл), помимо которых ПС клеток ФП содержат каротиноиды, а в некоторых случаях и фикобилины. Известно 5 типов Хл — а, b, c, d, e. Пигментные системы всех без исключения групп водорослей содержат Хл<sub>α</sub> и каротиноиды. Хлорофиллы b, c, d, e, а также фикобилины встречаются выборочно лишь у определенных представителей ФП (см. ниже).

Хлорофиллы представляют собой сложные эфиры дикарбоновой кислоты. Каротиноиды — это группа жирорастворимых пигментов, которая подразделяется на: а) каротины (углероды) и б) ксантофиллы (содержащие кислород в гидроксильных, карбонильных, метоксильных и других группах). Основными каротиноидами ФП являются β-каротин,<sup>7</sup> лютеин, виолаксантин, неоксантин, фукоксантин. Фикобилины в ПС клеток ФП представлены либо фикоцианином (голубого цвета), либо фикоэритрином (красного цвета).

Примечательной особенностью пигментов ФП является их способность, поглощая солнечный свет, флюоресцировать. В зависимости от сочетания пигментов различные представители ФП обнаруживают характерный эмиссионный спектр (рис. 6).

В полевых условиях проявление естественной флюоресценции ФП в спектрах  $R(0, \lambda)$  было обнаружено по полосе при 685 нм (Morel, Prieur, 1977; Neville, Gower, 1977). Теоретическое обоснование возможности отнесения возрастания интенсивности  $R(0)$  при  $\lambda = 685$  нм за счет флюоресценции ФП было предпринято в работе Гордона (Gordon, 1979a). Автор рассматривал акт флюоресценции как неупругое рассеяние фотонов, длины волн которых

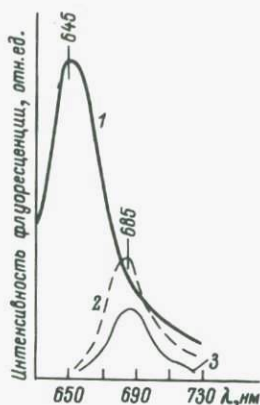
---

<sup>6</sup> У сине-зеленых имеются пигментсодержащие ламеллы-тилакоиды, пронизывающие всю клетку, но расположенные главным образом на периферии.

<sup>7</sup> Однако у некоторых представителей ФП в больших количествах обнаружен и α-каротин.

Рис. 6. Зависимость положения и интенсивности максимума флюоресценции Фп *in vivo* от его флористической принадлежности (Nusch, 1980).

Водоросли: 1 - сине-зеленые, 2 - зеленые, 3 - диатомовые.



лежат в полосе возбуждения с центром при  $\lambda_E$  и шириной  $\Delta\lambda_E$ . Вводя в рассмотрение малый объем  $\Delta V$  флюоресцирующего вещества, в котором естественным освещением создана энергетическая облученность  $H(\lambda_E)/\text{м}^2\text{нм}$ , и обозначая через  $I(\theta, \lambda_F)$  [вт/стер.нм] интенсивность флюоресцентного излучения, наблюдаемого в телесном угле  $\Omega$  под углом  $\theta$  к направлению распространения потока возбуждающего излучения, Гордон (Gordon, 1979a) параметризует коэффициент флюоресценции  $\Phi(\lambda_E, \lambda_F)$  [ $\text{м}^{-1}\cdot\text{нм}^{-1}$ ] следующим соотношением:

$$\Phi(\lambda_E, \lambda_F) = \int_{\Omega} \frac{\int_{\Delta\lambda_F} J(\theta, \lambda_F) d\lambda_F}{\Delta V \int_{\Delta\lambda_E} H(\lambda_E) d\lambda_E} d\Omega. \quad (5)$$

В таком случае квантовый выход флюоресценции  $\eta(\lambda_F, \lambda_E)$  может быть представлен в виде отношения

$$\eta(\lambda_F, \lambda_E) = \frac{\lambda_F}{\lambda_E} \cdot \frac{\Phi(\lambda_F, \lambda_E)}{\alpha(\lambda_E)} \Delta\lambda_F, \quad (6)$$

где  $\alpha(\lambda_E)$  - коэффициент поглощения возбуждающего излучения с  $\lambda = \lambda_E$  флюоресцирующим веществом в заданном объеме  $\Delta V$ .

Поскольку интенсивность полосы флюоресценции ФП в спектре  $R(0, \lambda)$  должна быть прямо пропорциональна величине  $\eta$ , принципиальным вопросом оказывается оценка тех значений  $\eta$ , при которых по спектру  $R(0, \lambda)$  можно зарегистрировать флюоресценцию ФП. Оказалось, что экспериментально наблюдаемые в спектрах  $R(0, \lambda)$  интенсивности полосы при 685 нм могут быть объяснены в рамках предложенной Гордоном параметризации, если принять  $\eta = 0.7 \pm 0.8\%$ . Эти значения  $\eta$  не только не превосходят, но даже ниже тех, что были получены в лабораторных условиях при измерениях *in vivo* квантового выхода флюоресценции  $\chi_{\alpha}$  в различных культурах ФП. Так, по данным Кифера (Kiefer, 1973), среднее значение  $\eta$  для образцов различных представителей ФП составляло 5%.

Таким образом, согласно Гордону, полоса при 685 нм в спектре  $R(0, \lambda)$  может быть с большой долей уверенности отнесена за

счет флуоресценции  $X_{л\alpha}$ . Отсюда следовало, что возрастание величины  $R(0, \lambda)$  при 685 нм можно использовать в целях дистанционного зондирования ФП. В связи с этим была определена глубина  $Z_{90}$ , с которой 90% неупруго рассеянной (высвеченной  $X_{л\alpha}$ ) радиации достигнет поверхности океана (Gordon, 1979b). Оказалось, что глубина проникновения  $Z_{90}$  излучения с  $\lambda = 685$  нм для концентраций  $X_{л\alpha}$  (вместе с феопигментами)  $C_{\Sigma} = 0-5$  мг/м<sup>3</sup> составляет около 3 м, а при  $C_{\Sigma} = 10$  мг/м<sup>3</sup>  $Z_{90} = 2$  м.

Были также выполнены измерения уходящего с водного горизонта излучения в диапазоне длин волн 380-750 нм на глубинах 1, 6, 11 м в условиях безоблачного неба. Измерения позволили установить связь между естественной флуоресценцией *in vivo* ФП на длине волны 685 нм и  $C_{X_{л\alpha}}$  для вод типа<sup>8</sup> I по классификации Мореля и Приёра (Morel, Prieur, 1977). При значительном содержании  $X_{л\alpha}$  в воде<sup>9</sup> интенсивность полосы флуоресценции на горизонте  $z$  ( $I_z$ ) оказалась нелинейно связанной с  $C_{X_{л\alpha}}$ :

$$\frac{I_z}{E_z} = A \cdot [C_{X_{л\alpha}}(z)]^B, \quad (7)$$

где  $E_z$  - общая облученность горизонта  $z$  сверху;  $A$  и  $B$  - постоянные коэффициенты.

В работе Говера (Gower, 1980) сообщается о попытке использования интенсивности флуоресцентной полосы  $X_{л\alpha}$  при длине волны 685 нм для количественной оценки дистанционными методами содержания  $X_{л\alpha}$  в воде. Спектр радиации от поверхности воды регистрировался в диапазоне 400-800 нм с высоты 3 м. На каждой станции определялся вертикальный профиль  $C_{X_{л\alpha}}$  и вычислялась средневзвешенная (эффективная) концентрация  $X_{л\alpha}$ . Затем искалась корреляция между  $C_{эф}$ ;  $X_{л\alpha}$  и интенсивностью полосы при 685 нм. В отличие от результатов предыдущей работы эта связь оказалась линейной. Автор считает, что метод обладает удовлетворительной чувствительностью при  $C_{эф}$ ;  $X_{л\alpha} \geq 1$  мг/м<sup>3</sup>.

Представляется, что к результатам упомянутых работ следует подходить с осторожностью. Как видно на рис. 6, интенсивность полосы флуоресценции при 685 нм обнаруживает явную изменчивость в зависимости от флористической принадлежности ФП. Это еще более отчетливо следует из рис. 7 (Nusch, 1980). Можно ожидать, что в естественных условиях с разнообразными и изменчивыми в пространстве и во времени флористическими композициями популяций ФП в водоемах зависимость интенсивности флуоресценции ФП (оцениваемой исключительно по интенсивности полосы

<sup>8</sup> Для вод, первичные гидрооптические характеристики которых в основном определяются присутствием ФП (и детрита).

<sup>9</sup> При малых  $C_{X_{л\alpha}}$  зависимость (7) не выполняется.

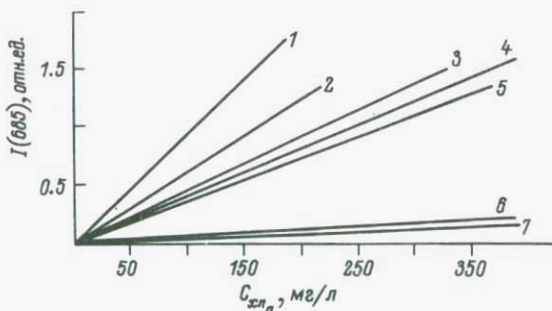


Рис. 7. Зависимость интенсивности полосы флуоресценции при 685 нм от  $C_{Хл_а}$  для различных культур ФП.

1 - *Gyrosigma*, 2 - *Phaedactylum*; 3 - *Selenastrum*; 4 - *Chlorella*; 5 - *Seenedasmus*, 6 - *Nactoc*; 7 - *Ana-boena*.

при  $\lambda=685$  нм) от  $C_{Хл_а}$ , установленная для какой-либо конкретной ситуации, едва ли может быть универсально репрезентативна.<sup>10</sup>

Внимательное изучение спектров возбуждения флуоресценции  $Хл_а$  в ФП показало (Yentsch, Yentsch, 1979; Yentsch, Phinney, 1984), что определенным флористическим группам водорослей можно соотнести вполне определенную спектральную кривую возбуждения (рис. 8). Различия в спектрах возбуждения объясняются наличием в ПС клеток ФП специфических пигментов. Так, например, наличие фукоксантина в диатомовых или перидинина в динофлагелятах обуславливает возбуждение флуоресценции  $Хл_а$  не только излучением с  $\lambda=450$  нм, но и с  $\lambda=525-530$  нм. Отсутствие каротиноидно-протеинового комплекса у зеленых приводит к тому, что спектр возбуждения сужается до одной полосы при 450 нм. Многие, в особенности океанические, представители ФП содержат в ПС фикобилины, поглощающие излучение в районе 500 нм и флуоресцирующие в довольно широкой полосе с центром при 560-580 нм.

Таким образом, спектр излучения ФП (в зависимости от его флористической принадлежности) может быть представлен либо одной полосой (при 685 или 560-580 нм), либо двумя (при 685 и 560-580 нм) (рис. 8). Указанное различие в эмиссионных спектрах ФП разных форм в принципе дает возможность разработать такую методику дистанционной индикации ФП, которая позволяет осуществлять диагностику принадлежности ФП обследуемого водоема к тем или

<sup>10</sup> К этому следует добавить, что интенсивность флуоресценции  $Хл_а$ , как указывается в работе Хини (Heaney, 1978), существенно зависит от физиологического состояния клетки ФП, определяемого уровнем трофии водоема и условиями освещения.

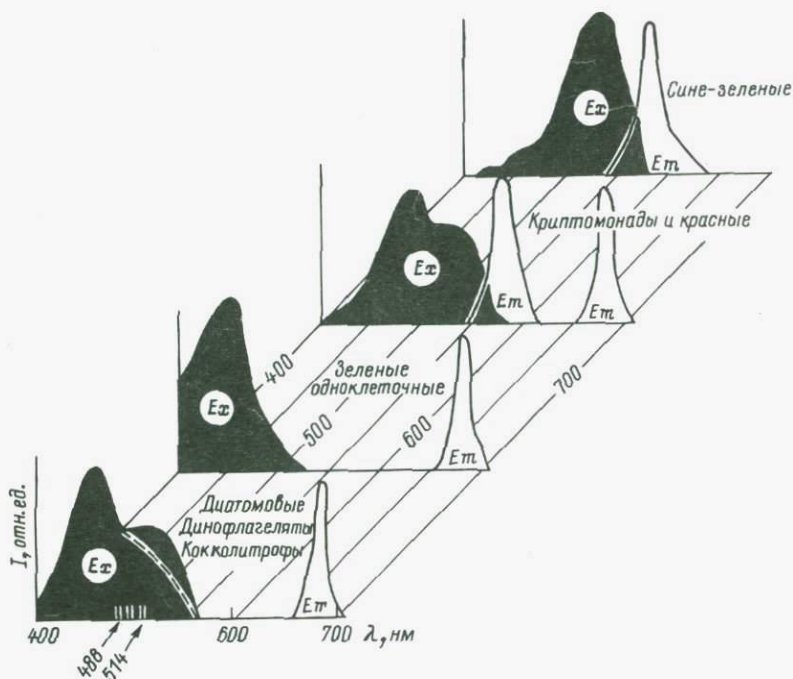


Рис. 8. Спектры поглощения и флюоресценции основных океанических групп ФП.

$E_x$  - возбуждение,  $E_m$  - эмиссия.

иным группам (например, к группам представителей ФП, содержащим или не содержащим фикобилины, табл. 5).

Интересно отметить, что, согласно Йентшу и Фини (Yentsch, Phinney, 1984), одновременный анализ спектров возбуждения, флюоресценции, а также распределения по размерам ФП в зал. Бусбей (Майн, США) привел к выводу, что флюоресцентная полоса при 560–580 нм обнаруживалась исключительно в отфильтрованных пробах, содержащих частицы ФП с размером  $\sim 0,5$  мкм, в то время как каротиноидные комплексы в наибольшей степени были характерны для представителей ФП, размер которых составлял  $\sim 10$  мкм.

Такие, пусть и весьма ограниченные, таксономические и аллометрические возможности флюоресцентного метода, по мнению авторов (Yentsch, Phinney, 1984), могут лечь в основу экспрессной (по крайней мере для контактных методов) диагностики водных масс. Что касается применения естественной флюоресценции ФП для его дистанционной (пассивной) индика-

Таблица 5

Наблюдаемые полосы флюоресценции у различных групп ФП  
(Yentsch, Phinney, 1984)

Группа ФП	Дополнительные (к $X_{L\alpha}$ ) пигменты	Наличие в спектре по- лосы флюоресценции		$\frac{I(530, 685)}{I(450, 685)}$
		при 685 нм	при 560- 580 нм	
Диатомовые	$X_{Lc}$ , фукоксантин	Да	Нет	0,8-0,9
Диофлагелляты (перидиней)	$X_{Lc}$ , перидинин	Да	Нет	0,7-0,8
Кокколитофоры	$X_{Lc}$ , НКК*	Да	Нет	0,3-0,4
Золотисто-коричне- вые одноклеточные	$X_{Lc}$ , НКК*	Да	Нет	0,3-0,4
Зеленые одно- клеточные	$X_{Lb}$ , $X_{Lc}$ , фико- цианин, фикоэри- трин	Да	Нет	0,1-0,2
Криptomonады		Да	Да	0,1-0,8
Цианобактерии	Фикоцианин, фи- коэритрин	Нет**	Да	-

Примечания. \* НКК - неидентифицированный каротиноидный комплекс.  
\*\* Не наблюдается у молодых морских культур, у старых на этой длине волны регистрируется слабое излучение.

ц и и, то следует признать малую перспективность данного подхода.<sup>11</sup> Причин тому несколько. Прежде всего в спектре  $R(0, \lambda)$  до сих пор уверенно наблюдалась лишь полоса при 685 нм, причем ее относительная интенсивность не превышала 1% (Morel, Prieur, 1977); как отмечалось выше, она может нести информацию лишь о существенно поверхностном слое воды. В связи с этим уместно напомнить о тех неопределенностях, какие возникают при попытках установить корреляцию между  $I_{685}$  и  $C_{X_{L\alpha}}$ . Наблюдение эмиссионной полосы при 560-580 нм в слабо структурированном спектре  $R(0, \lambda)$  (или  $B(\lambda)$ ) весьма затруднительно: помимо процессов рассеяния и поглощения многочисленными оптически активными компонентами естественных вод, формирующих спектр  $R(0, \lambda)$ , определенную роль могут играть и эмиссии, обусловленные флюоресценцией не только ФП, но и РОВ, а также нефтяных бликов (если, разумеется, таковые присутствуют).<sup>12</sup> Действительно, согласно „Оп-

<sup>11</sup> Существует и иная точка зрения по этому вопросу. В работе Говера (Gower, 1981) высказывается мнение, что при соответствующих технических усовершенствованиях приемной аппаратуры мониторинг ФП, основанный на регистрации естественной флюоресценции ФП, можно будет осуществлять даже с борта орбитального космического аппарата.

<sup>12</sup> Что, кстати сказать, лишний раз свидетельствует о сложности интерпретации спектров  $R(0, \lambda)$  и  $B(\lambda)$  с целью восстановления по ним  $C_{X_{L\alpha}}$ .

тике океана" (1983), флюоресценция РОВ<sup>13</sup> в морской воде возбуждается не только ультрафиолетовым, но и видимым излучением. В частности, полосы флюоресценции РОВ, возбуждаемые излучением с  $\lambda=313, 365$  и  $436$  нм, имеют максимумы при  $\sim 415$  и  $520$  нм соответственно, а их полуширины составляют  $140-160$  нм. В работе Бурламачи, Печи и Мазиньи (Burlamacchi, Cecchi, Mazzinghi, 1983) сообщается о том, что излучение с длинами волн в диапазоне  $308-420$  нм вызывает флюоресцентное свечение нефтяных пленок (толщиной от  $0,01$  мкм до  $1$  мм), характеризующееся широкими эмиссионными полосами,<sup>14</sup> которые в совокупности перекрывают широкую спектральную область от  $\sim 400$  до  $600-650$  нм и имеют максимумы при  $400, 450, 550$  и  $\sim 620$  нм (отметим, что квантовый выход флюоресценции варьировал для разных  $\lambda_{\text{возб}}$  от  $6$  до  $55\%$ ).

В последнем столбце табл. 5 приведены значения отношений интенсивностей полос флюоресценции ФП при  $685$  нм, возбужденных излучением с  $\lambda=450$  и  $530$  нм. Из этих данных видно, что указанное отношение может быть в принципе использовано для усовершенствования таксономической функции флюорометрического метода. Однако осуществление этой задачи возможно лишь с использованием лазерной техники, т.е. путем активного зондирования. Именно с ним в последнее время связываются большие надежды в развитии дистанционных методов индикации ФП. Остановимся кратко на методической стороне этого типа зондирования (без учета влияния атмосферы).

Фотоны когерентного лазерного излучения при прохождении через водную среду испытывают со стороны последней поглощение и рассеяние, причем рассеяние обусловлено тремя механизмами: упругим и неупругим рассеянием на молекулах воды и, в общем случае, на растворенных в ней веществах (подобное рассеяние называют соответственно релеевским и рамановским, или комбинационным, рассеянием), а также упругим рассеянием на гидролизе (рассеяние Ми). Согласно Ерлову (1980), из трех упомянутых видов рассеяния самый слабый эффект производит релеевское рассеяние.

Введем следующие обозначения:  $Z$  - расстояние от флюориметра до поверхности воды (м);  $n$  - коэффициент преломления воды;  $C_L, C_R, C_F$  - эффективные коэффициенты ослабления ( $\text{м}^{-1}$ ) соответственно для лазерного излучения, комбинационно рассеянного света (КР) и флюоресцентного излучения;  $N_M, N_R, N_F$  - концентрации в воде агентов, обуславливающих соответственно рассеяние Ми (РМи), КР и флюоресценцию ( $\text{м}^{-3}$ );  $\sigma_M, \sigma_R$  - сечения рассея-

<sup>13</sup> Флюоресцируют, по-видимому, преимущественно низко- и среднемoleкулярные фракции РОВ (Оптика океана, 1983).

<sup>14</sup> Интенсивность флюоресценции с увеличением толщины пленки растет почти линейно вплоть до значений  $\Delta=10^{-5}$  м, при больших  $\Delta$  наступает насыщение.

ния  $M_i$  и  $KP$  ( $m^2$ );  $\sigma_F$  - сечение флюоресценции ( $m^2$ );  $K_1, K_2, K_3$  - спектральные коэффициенты, учитывающие излучаемую лазером мощность, инструментальные параметры и отражательные свойства водной поверхности соответственно для РМи, КР и флюоресцентного излучения.

Мощность сигнала, воспринимаемого дистанционным флюориметром, равна сумме трех основных составляющих -  $P_R, P_M$  и  $P_F$ , представляющих собой мощности световых потоков, обусловленные КР, РМи и флюоресценцией. Эти составляющие (Exton, Houghton, Esaias et al., 1983) могут быть описаны следующими формулами:

$$P_R = \frac{K_2}{m^2 Z^2} \cdot \frac{N_R \cdot \sigma_R}{c_L + c_R},$$

$$P_M = \frac{K_1}{m^2 Z^2} \cdot \frac{N_M \cdot \sigma_M}{2c_L},$$

$$P_F = \frac{K_3}{m^2 Z^2} \cdot \frac{N_F \cdot \sigma_F}{c_L + c_F}.$$
(8)

Как видно из (8),  $P_R$  полностью определяется оптическими свойствами воды как таковой в точке зондирования, в то время как  $P_M, P_F$  зависят соответственно от концентрации гидрозоля и флюоресцирующего вещества. Для расчета  $P_F$  необходимо, кроме того, знание величины  $c_F$ . Все это весьма осложняет задачу оценки сигнала от флюоресцирующего агента. Однако ввиду того что было сказано о  $P_R$ , можно использовать рамановскую составляющую регистрируемого сигнала как нормализующий фактор, т.е. рассматривать не сами величины  $P_M, P_F$ , а следующие отношения:

$$\frac{P_M}{P_R} = K_4 \frac{N_M \cdot \sigma_M}{N_R \cdot \sigma_R} \cdot \frac{c_L + c_R}{2c_L},$$

$$\frac{P_F}{P_R} = K_5 \frac{N_F \cdot \sigma_F}{N_R \cdot \sigma_R} \cdot \frac{c_L + c_R}{c_L + c_F},$$
(9)

где  $K_4 = K_1/K_2$ ,  $K_5 = K_3/K_2$ .

Таким образом, появляется возможность оценивать мощность сигналов  $P_M$  и  $P_F$  в долях  $P_R$  - своеобразного внутреннего «репера».

Кроме того, отношения (9) удобны и потому, что они уже не зависят от мощности лазера, высоты прибора над поверхностью воды, а также в значительной мере и от параметров аппаратуры.

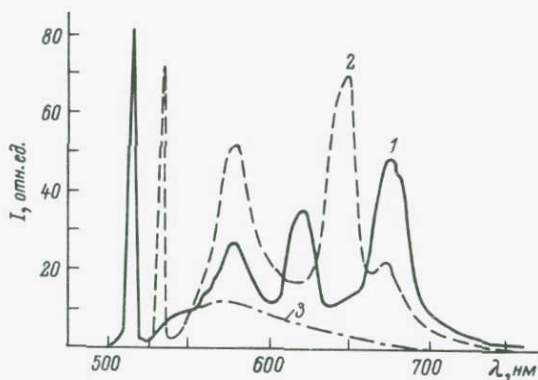


Рис. 9. Спектры сигналов, воспринимаемые дистанционным флуориметром при облучении водной поверхности лазерным излучением с  $\lambda = 514.5$  нм (1) и  $\lambda = 532.0$  нм (2) и спектр выделенного сигнала, обусловленного флуоресценцией растворенных органических веществ (3).

В работах (Exton, Houghton, Esaias et al., 1983; Houghton, Exton, Gregory, 1983) сообщается об экспериментальной проверке выполнимости соотношений (9) и апробации этой методики в лабораторных и полевых условиях. На рис. 9 приведены полученные спектры сигналов, зарегистрированные от двух возбуждающих излучений. Отчетливо проявляются полосы флуоресценции при 580 и 685 нм, которые, как следует из сказанного выше, принадлежат соответственно фикоэритрину и  $\text{Хл}_a$ . Кроме того, имеются полосы, обусловленные РМи и КР, а также широкая несимметричная полоса флуоресценции РОВ, проявляющаяся в виде плеча при  $\sim 530\text{--}540$  нм (ее максимум для  $\lambda_{\text{возб}} = 514.5$  нм находится, по-видимому, при  $\sim 560\text{--}570$  нм). Таким образом, интенсивности полос флуоресценции фикоэритрина и  $\text{Хл}_a$  не свободны от влияния по крайней мере трех дополнительных полос.

Возникает вопрос о выборе оптимальной длины волны возбуждающего излучения, когда это влияние легче всего учесть при оценке отношений (9). Для уменьшения влияния флуоресцентной полосы РОВ следует снизить длину возбуждающего излучения (Оптика океана, 1983). Однако уже при  $\lambda_{\text{возб}} = 532.0$  нм (рис. 9) полоса КР, значительно возрастая по интенсивности, сдвигается в длинноволновую область, на ее фоне полоса флуоресценции  $\text{Хл}_a$  при 685 нм проявляется лишь как плечо. В связи с этим авторы обсуждаемых исследований считают, что оптимальной длиной волны возбуждающего лазерного излучения следует признать  $\lambda_{\text{возб}} = 520$  нм.

Оценка выполнимости соотношений (9) дала положительные результаты: были получены линейные зависимости отношений  $P_M/P_R$  и  $P_F/P_R$  от концентраций соответственно гидрозоля и  $X_{\alpha}$ . Однако следует отметить, что дисперсии экспериментальных точек были значительными. По нашему мнению, этот эффект закономерен по причинам, обсуждавшимся выше. Более высокая точность определения концентрации  $X_{\alpha}$  и возможность дифференциации групп ФП может быть достигнута применением двух лазеров с разными  $\lambda_{\text{возб}}$  (см. табл. 5), а также точным учетом контура эмиссионной полосы РОВ для каждой  $\lambda_{\text{возб}}$ .

При этом, однако, возникает необходимость учета того фактора, что глубина зондирования на разных  $\lambda_{\text{возб}}$  (в особенности, если они существенно разнесены) различна. Это достаточно сложный методический вопрос, который, насколько нам известно, еще не рассматривался и ждет своего разрешения.

Уместно напомнить и о проблеме восстановления по данным дистанционных измерений вертикальной стратификации поля концентрации ФП ( $X_{\alpha}$ ). Здесь есть определенные основания надеяться, что флюоресцентная методика может оказаться достаточно эффективной: по крайней мере уже сейчас (Venoble, Punjabi, Poole, 1984) существует возможность при активном лазерном зондировании восстанавливать вертикальный профиль  $C_{X_{\alpha}}$  при ее линейном изменении с глубиной.

Отдавая должное многим достоинствам метода активного лазерного зондирования (которые следовало бы скорее определить как потенциальные, нежели как уже реализованные), следует подчеркнуть, однако, что до сих пор отсутствует основной компонент метода: нет обоснованного, статистически достоверного биооптического алгоритма, связывающего  $C_{X_{\alpha}}$  и интенсивность флюоресцентного сигнала. Не свободен этот метод и от влияния такого фактора, как состояние водной поверхности (волнение, наличие нефтяных пленок и т.д.). Серьезным ограничением в применении метода может являться и необходимость использования лазеров большой мощности при зондировании с высоколетящих носителей.<sup>15</sup> Тем не менее необходимость дальнейшей разработки этого направления не вызывает сомнений.

Заканчивая настоящий обзор, в котором мы попытались рассмотреть совокупность методических вопросов, связанных с индикацией ФП, следует еще раз подчеркнуть, что, не смотря на несомненные успехи, достигнутые в этом направлении, существует еще ряд нерешенных проблем. Они связаны прежде всего с установлением более адекватных биооптических алгоритмов, которые были бы чувстви-

---

<sup>15</sup> Иллюстрацией этому могут служить оценки (Houghton, Exton, Gregory, 1983), согласно которым подъем дистанционного измерителя флюоресценции от поверхности воды до высоты только 150 м потребует увеличения отношения сигнал/шум в 60 раз.

тельны к флористической принадлежности ФП и обладали высокой точностью в случае водоемов, характеризующихся значительными концентрациями желтого вещества и МВ. Заслуживает пристального внимания и необходимость разработки методик восстановления по данным дистанционных измерений распределения ФП (Хл) по глубине. К этому следует добавить и круг вопросов, оставшихся за пределами обзора, но имеющих чрезвычайно важное значение для дистанционного мониторинга, а именно: разработка алгоритмов атмосферной коррекции в условиях, когда, с одной стороны, в водоеме велики концентрации Хл, РОВ и МВ, а, с другой — дымка над поверхностью столь оптически сложных вод морфологически горизонтально неоднородна. Таковы, по-видимому, основные задачи, от решения которых во многом зависит успешное развитие в будущем практических методов дистанционного мониторинга естественных водоемов.

### Л и т е р а т у р а

- А н т р о п о г е н н о е э в т р о ф и р о в а н и е Л а д о ж с к о г о о з е р а . — Л., 1982. 304 с.
- А р с т Х.Ю., К а с к Х.К., С о о м е р В.Ю. К вопросу об интерпретации спектров диффузного отражения моря. — В кн.: Исследования изменчивости оптических свойств Балтийского моря. Таллин, 1983, с. 89—111.
- Б а с л а в с к а я С.С. Фотосинтез. М., 1974. 199 с.
- Б е к а с о в а О.Д., Ц в е т к о в а А.М., Е в с т и г н е е в В.Б. Об изменениях пигментной системы океанического фитопланктона. — В кн.: Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М., 1975, с. 235—242.
- В и н б е р г Г.Г. Содержание хлорофилла как показателя количественного развития фитопланктона. — В кн.: Вопросы экологии. Минск, 1957, т. 1, с. 15—18.
- Д а в ы д о в а Н.Н., П е т р о в а Н.А. Эколого-систематическая характеристика водорослей Ладожского озера. — В кн.: Растительные ресурсы Ладожского озера. Л. 1968, с. 175—199.
- Е р л о в Н.Г. Оптика моря. Л., 1980. 248 с.
- К о з л я н и н о в М.В., П е л е в и н В.Н. Об использовании одномерного приближения при исследовании распространения оптического излучения в море. — Тр. ИОАН СССР, 1965, т. 77, с. 73—79.
- О п т и к а о к е а н а . Т. 1. Физическая оптика океана. М., 1983. 372 с.
- Т р и ф о н о в а И.С. Состав и продуктивность фитопланктона разнотипных озер Карельского перешейка. Л., 1979. 168 с.
- Х а л т у р и н В.И., Т о л к а ч е н к о Г.А. Оценка возможностей дистанционного определения неоднородностей вертикальной стратификации океана. — В кн.: Неконтактные методы

измерения океанографических параметров. М., 1983, с. 112-116.

Х и т О. Фотосинтез. М., 1972. 315 с.

A u s t i n R.W. The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface. - In: Optical Aspects of Oceanography/Ed. N.G. Jerlov and E.S. Nielson. London, 1974, Ch. 14, p. 317-344.

B r i c a u d A., M o r e l A., P r i e u r L. Optical efficiency factors of some phytoplankters. - Limnol. Oceanogr., 1983, vol. 28, N 5, p. 816-832.

B r y a n t F.D., S e i b e r B.A., L a t i m e r P. Absolute optical cross sections of cells and chloroplasts. - Arch. Biochem. Biophys., 1969, vol. 135, p. 79-108.

B u k a t a R.P., J e r o m e J.H., B r u t o n J.E. Optical water quality model of lake Ontario: I. Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in lake Ontario. - Appl. Opt., 1981, vol. 20, N 9, p. 1696-1714.

B u k a t a R.P., B r u t o n J.E., J e r o m e J.H. e t a l. Optical water quality model of lake Ontario: II. Determination of chlorophyll "a" and suspended mineral concentration of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. - Appl. Opt., 1981, vol. 20, N 9, p. 1704-1714.

B u k a t a R.P., B r u t o n J.E., J e r o m e J.H. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. - Remote Sens. Environ., 1983, vol. 13, p. 161-177.

B u r l a m a c c h i P., C e c c h i G., M a z z i n g h i P. Performance evaluation of UV sources for lidar fluoresencing of oil films. - Appl. Opt., 1983, vol. 22, N 1, p. 48-53.

C a r a u x D., A u s t i n R.W. Delineation of seasonal changes of chlorophyll frontal boundaries in the Mediterranean coastal waters with Nimbus-7 coastal zone color scanner data. - Remote Sens. Environ., 1983, vol. 13, N 3, p. 239-249.

C l a r k D.K., B a k e r A.E., S t r o n g A.E. Upwelled spectral radiance distribution in relation to particulate matter in sea water. - Boundary-Layer Meteorol., 1980, vol. 18, p. 287-298.

C l a r k D.K. Phytoplankton pigment algorithms for the Nimbus-7 CZCS. - In: Oceanography from space. N.Y., 1981, p. 227-237.

D e n m a n K.L. The chlorophyll fluctuation spectrum in the sea. - Limnol. Oceanogr., 1977, vol. 22, N 6, p. 1033-1037.

- D o e r f f e r R. Light field fluctuations in the photic zone. - Arch. Hydrobiol., 1979, vol. 86, p. 119-123.
- E x t o n R.J., H o u g h t o n W.M., E s a i - a s W. e t a l. Laboratory analysis of techniques for remote sensing of estuarine parameters using laser excitation. - Appl. Opt., 1983, vol. 22, N 1, p. 54-64.
- F i s h e r J., G a s s e l H. Upward radiances in and above an ocean depending on phytoplankton, sediment, yellow substances and bacteria concentration. - In: A Collection of extended abstracts presented at the Symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of ocean properties: IAMAP Third Scientific Assembly, 17-28 August 1981. Hamburg, 1981, p. 73-75.
- F i s c h e r J., K o e p k e P. The influence of perturbing water properties in chlorophyll mapping. - Proc. of IGARSS'84 Symposium, Strasbourg, 27-30 August 1984. Strasbourg, 1984, p. 709-713.
- G o r d o n H.R. Spectral variations in volume scattering function at large angles in natural waters. - J. Opt. Soc. Amer., 1974, vol. 64, p. 773-775.
- G o r d o n H.R. Remote sensing of optical properties in continuously stratified waters. - Appl. Opt., 1978, vol. 17, N 12, p. 1893-1897.
- G o r d o n H.R. Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685 nm. - Appl. Opt., 1979a, vol. 18, N 18, p. 1161-1166.
- G o r d o n H.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in natural waters for the remote sensing of chlorophyll-a via in vivo fluorescence. - Appl. Opt., 1979b, vol. 18, N 12, p. 1883, 1884.
- G o r d o n H.R., B r o w n O.B., J a c o b s M.M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. - Appl. Opt., 1975, vol. 14, p. 417-427.
- G o r d o n H.R., C l a r k D.K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. - Appl. Opt., 1980a, vol. 19, N 20, p. 3428-3430.
- G o r d o n H.R., C l a r k D.K. Atmospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments. - Boundary-Layer Meteorol., 1980b, vol. 18, p. 299-313.
- G o r d o n H.R., C l a r k D.K., B r o w n J.W. e t a l. Satellite measurement of the phytoplank-

- ton pigment concentration in the surface waters of a warm core Gulf Stream ring. - *J. Marine Res.*, 1982, vol. 40, N 2, p. 491-502.
- G o w e r J.F.R. Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. - *Boundary-Layer Meteorol.*, 1980, vol. 18, p. 235-245.
- G o w e r J.F.R. On the possibility of observing natural chlorophyll-a fluorescence from space. - In: A Collection of extended abstracts presented at the Symposium on the radiation transfer in the oceans and remote sensing of ocean properties: IAMAP Third Scientific Assembly, 17-28 August 1981. Hamburg, 1981, p. 113-116.
- H e a n e y S.I. Some observation of the in vivo fluorescence technique to determine chlorophyll-a in natural populations and cultures of fresh water phytoplankton. - *Freshwater Biology*, 1978, vol. 8, p. 116-126.
- H o u g h t o n W.M., E x t o n R.J., G r e e g o r y R.W. Field investigation of techniques for remote laser sensing of oceanographic parameters. - *Remote Sens. Environ.*, 1983, vol. 13, N 1, p. 17-32.
- J o n a s z M. The particle size distribution in the Baltic. - *Proc. of the XIII Conf. of Baltic oceanographers*. Helsinki, 1982, vol. 11, p. 406-418.
- J o n e s R.I., F r a n c i s R.C. Dispersion patterns of phytoplankton in lakes. - In: *Lakes and water management*; - *Proc. of the 30-year Symposium of the Finnish Limnological Society*. Helsinki, 1982, p. 21-28.
- K i e f e r D.A. Fluorescence properties of natural phytoplankton populations. - *Marine Biol.*, 1973, vol. 22, p. 263-269.
- K i e f e r D.A., O l s o n R.L., W i l s o n W.H. Reflectance spectroscopy of marine phytoplankton. Pt I. Optical properties as related to age and growth rate. - *Limnol. Oceanogr.*, 1979, vol. 24, N 4, p. 664-673.
- K i r k J.T. Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in and the relationships between optical properties of turbid yellow waters. - *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 1981, vol. 32, p. 517-532.
- K i r k J.T. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water

- on solar altitude. - *Limnol. and Oceanogr.*, 1984, vol. 29, N 2, p. 350-356.
- K o n d r a t y e v K.Ya. Radiation processes in the atmosphere. - *WMO Monogr.*, N 309, Geneva, 1972. 214 p.
- M o r e l A., B r i c a u d A. Theoretical result concerning the optics of phytoplankton with special reference to remote sensing applications. - In: *Oceanography From Space: COSPAR(SCOR) IUCRM Symp. Plenum*, 1981, p. 313-327.
- M o r e l A., P r i e u r L. Analysis of variations in ocean color. - *Limnol. Oceanogr.*, 1977, vol. 22, p. 709-722.
- M o t o a k i K., B o o t h Ch.R., O k a m i N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter and pure water. - *Limnol. and Oceanogr.*, 1984, vol. 29, N 2, p. 340-349.
- N e v i l l e R.A., G o w e r J.F.R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence. - *J. Geophys. Res.*, 1977, vol. 82, N 24, p. 3487-3493.
- N u s c h E.A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. - *Ergebnisse der Limnologie*, 1980, Bd 14, S. 14-36.
- P r e i s e n d o r f e r R.W. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. - *Hydrol. Opt.*, 1976, vol. 5, p. 16-27.
- S a t h y e n d r a n a t h S., M o r e l A. Light emerging from the sea-interpretation and uses in remote sensing. - In: *Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology*. Brussel, 1983, Ch. 16, p. 323-357.
- S m i t h R.C. Remote sensing and depth distribution of ocean chlorophyll. - *Marine Ecology. Prog. Ser.*, 1981, vol. 5, p. 359-361.
- S m i t h R.C., B a k e r K.S. Optical classification of natural waters. - *Limnol. Oceanogr.*, 1978, vol. 23, N 2, p. 260-267.
- S m i t h R.C., W i l s o n W.H. Ship and satellite bio-optical research in the California Bight. - In: *Oceanography From Space/Ed. J.F.R. Gower*, 1981, p. 281-293.
- V e n o b l e D.D., P u n j a b i A.R., P o d e L.R. Sensitivity of airborne fluorescence measurements to linear vertical gradients in chlorophyll con-

- centration. - Appl. Opt., 1984, vol. 23, N 7, p. 970-972.
- W r o b l e w s k i J.S., O' B r i e n J.J. A spatial model of phytoplankton patchiness. - Marine Biol., 1976, vol. 35, p. 161-175.
- Y e n t s c h C.S. The influence of phytoplankton pigments on the colour of sea water. - Deep-Sea Research, 1960, vol. 7, p. 1-9.
- Y e n t s c h C.S., P h i n n e y D.A. Spectral fluorescence: an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations. - Bigelow Laboratory for Ocean Sciences Contributions, 1984, N 84019. 30 p.
- Y e n t s c h C.S., Y e n t s c h C.M. Fluorescence spectral signatures: the characterization of phytoplankton populations by the use of excitation and emission spectra. - J. Marine. Res., 1979, vol. 37, N 3, p. 471-483.
- Z a n e v e l d J.R.V. Remotely sensed reflectance and its dependence on vertical structure: a theoretical derivation. - Appl. Opt., 1982, vol. 21, N 22, p. 4146-4150.

К.Я. Кондратьев, Л.Ф. Барышева,  
 Д.В. Поздняков (ИНОЗ АН СССР),  
 В.Г. Атанесян, А.А. Назарян (НИИФ КС ЕГУ)

#### ЛИДАРНОЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В ВОДАХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Примечательной особенностью пигментов фитопланктона (ФП) является их способность, поглощая солнечный свет, флуоресцировать (Баславская, 1974). В зависимости от сочетания пигментов различные представители фитопланктона обнаруживают характерный эмиссионный спектр (Jentsch, Phinney, 1984). В полевых условиях проявление естественной флуоресценции фитопланктона было обнаружено по полосе излучения при 685 нм (Morel, Prieur, 1977; Neville, Gower, 1977). Теоретическое обоснование возможности отнесения возрастания интенсивности яркости света, выходящего из-под воды, при длине волны 685 нм за счет флуоресценции фитопланктона было предпринято в работе Гордона (Gordon, 1979a). Однако применение естественной флуоресценции фитопланктона для его дистанционной пассивной индикации малоперспективно: относительная интенсивность полосы флуоресценции в спектре яркости сигнала не превышает 1%, эта полоса может нести информацию

лишь о существенно поверхностном слое воды (Gordon, 1979б). В связи с этим в последнее время большие надежды связываются с применением активных методов лазерного флуоресцентного зондирования фитопланктона с судового или аэроносителя.

Фотоны когерентного лазерного излучения при прохождении через водную среду испытывают со стороны последней поглощение и рассеяние, причем последнее обусловлено тремя механизмами: упругим и неупругим рассеянием на молекулах воды и (в общем случае) на растворенных в ней веществах (такое рассеяние называют соответственно релеевским и рамановским, или комбинационным, рассеянием), а также упругим рассеянием на гидрозоле (рассеяние Ми). Согласно Ерлову (1980), из трех перечисленных видов рассеяния самый слабый эффект производит релеевское рассеяние.

Можно показать (Bristow et al., 1981), что уравнение лазерного зондирования имеет вид

$$n_f = \left( \frac{P_F H^2}{P_L} \right) \left( \frac{4 \pi \Delta_F}{T \eta_{tr} \eta_{rec}} \right) \left\{ \frac{\mu_\omega^2 \exp[H(\beta_L + \beta_F)]}{(1 - R_\omega)^2} \right\} \left( \frac{k_L + k_F}{\sigma_f} \right) [\text{мг/м}^3], \quad (1)$$

где  $P_F$  — пиковое значение мощности (Вт) регистрируемого сигнала флуоресцентной эмиссии на длине волны  $F$ , соответствующей максимуму флуоресценции;  $P_L$  — пиковое значение выходной мощности (Вт) лазерного излучения на длине волны  $L$ ;  $H$  — высота приемной системы лидара над поверхностью водоема;  $T$  — эффективная площадь телескопа лидарного комплекса ( $\text{м}^2$ );  $\Delta_F$  — отношение ширины полосы флуоресцентной эмиссии к эффективной ширине полосы фильтра;  $\eta_{tr}$  — эффективность излучателя, т.е. лазера;  $\eta_{rec}$  — эффективность приемной системы лидара;  $R_\omega$  — коэффициент зеркального отражения в видимой области спектра на поверхности раздела вода-воздух при нормальном падении лазерного луча;  $\mu_\omega$  — коэффициент преломления воды в видимой области спектра;  $\beta_L$  — коэффициент ослабления коллимированного пучка лазера в атмосфере на длине волны  $L$  ( $\text{м}^{-1}$ );  $\beta_F$  — коэффициент ослабления потока флуоресцентной эмиссии в атмосфере на длине волны  $F$  ( $\text{м}^{-1}$ );  $k_L, k_F$  — эффективные коэффициенты ослабления излучения в воде с длиной волны соответственно  $L$  и  $F$  ( $\text{м}^{-1}$ );  $\sigma_f$  — эффективное сечение флуоресценции флуорофора.

При выводе уравнения (1) предполагалось, что флуорофор равномерно распределен по глубине (т.е.  $n_f$  и  $\sigma_f$  не зависят от глубины).

Используя уравнение (1), можно записать:

$$\left( \frac{P_F}{P_R} \right) = n_f \left( \frac{d_F}{d_R} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_\omega n_\omega} \right) \left( \frac{k_L + k_R}{k_L + k_F} \right), \quad (2)$$

где

$$d_i = \left( \frac{T \eta_{tr} \eta_{rec}}{4\pi \Delta_F} \right) \left\{ \frac{(1 - R_\omega)^2}{\mu_\omega^2 \exp[H(\beta_L + \beta_i)]} \right\},$$

а индекс  $i$  означает соответственно F или R.

В пределах обследуемой водной массы число молекул воды  $n_\omega$  и коэффициент сечения комбинационного рассеяния  $\sigma_\omega$  можно считать постоянными, отношение  $\frac{d_F}{d_R}$  также практически не должно меняться, оставаясь близким единице (поскольку  $\beta_F \approx \beta_R$ ; Kondratyev, 1972). Отсюда сигнал от комбинационного рассеяния может быть использован в качестве внутреннего репера (Фадеев, 1978; Bristow et al., 1981), а само отношение  $P_F/P_R$  — в качестве меры содержания флуорофора в исследуемой среде. При этом, однако, должно выполняться условие неизменности (в пределах зондируемой водной массы) как отношения  $(k_L + k_R/k_L + k_F)$ , так и величины  $\sigma_f$ . Это означает, что оптически активные компоненты исследуемого водоема (или его части) не должны существенно меняться по составу (в том числе и ФП), хотя при этом не накладываются ограничения на их концентрационные вариации при примерном сохранении процентной пропорциональности между собой.

Исследования, осуществленные рядом научных коллективов (Фадеев, 1978; Аброскин и др., 1981; Bristow et al., 1981) и авторами этой статьи на разнообразных водных объектах (океаны, морские заливы, озера, водохранилища) с применением метода активной лазерной локации, показали, что для определенных пределов значений  $C_{Хл_\alpha}$  действительно может быть установлена линейная

регрессионная связь между  $(P_F/P_R)$  и  $C_{Хл_\alpha}$ . Так, согласно

В.В. Фадееву (1978), корреляционный анализ результатов измерений с борта нис „Дмитрий Менделеев“, проведенный в океанских водах, привел к следующему эмпирическому выражению:

$$C_{Хл_\alpha} [\text{мкг/л}] = (2.6 \pm 0.3) (P_F/P_R) [\lambda_{\text{возб}} = 532 \text{ нм}]. \quad (3)$$

Измерения с борта вертолета, осуществленные над зал. Лас-Вегас (Bristow et al., 1981), также обнаружили линейную связь между отношением  $(P_F/P_R)$  и  $C_{Хл_\alpha}$  до значений  $< C_{Хл_\alpha} >$  порядка 20–22 мг/м<sup>3</sup>. При больших количествах  $Хл_\alpha$  в воде обобщаемая связь носит нелинейный характер.

Летом 1985 г. с помощью лидарного комплекса, установленного на борту МИ-8, были осуществлены экспериментальные дистанционные определения концентраций  $Хл_\alpha$  на оз. Севан, Куйбышевском водохранилище и Онежском озере. Комплекс содержал лазер АИГ, калибровочный источник света, приемно-передающую оптическую систему, приемный оптический телескоп, полихроматор, систему фото-

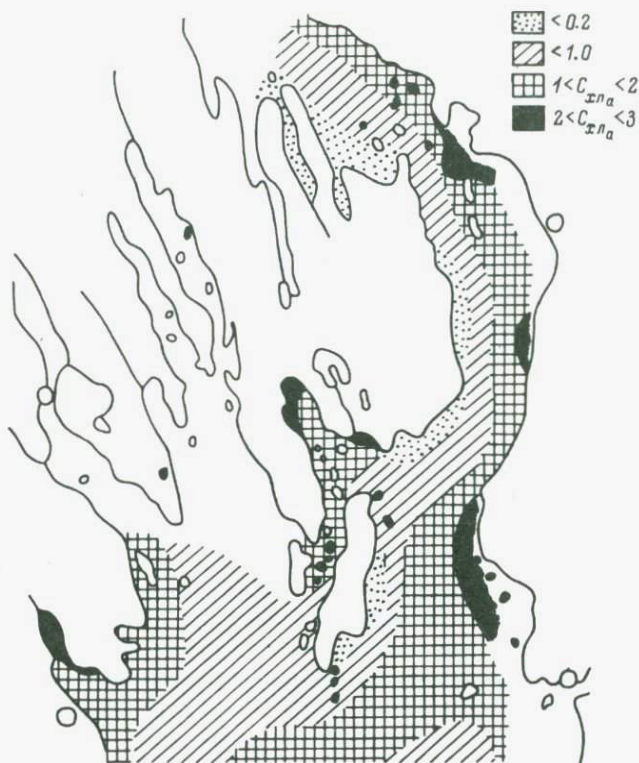
приемников, систему усилителей, задержек и аналогоцифровых преобразователей, информационно-вычислительную систему на базе крейта КАМАК и микроЭВМ, предназначенную для автоматизации сбора, накопления, обработки спектрометрической информации и вывода данных. Оптический сигнал, поступавший на вход спектрометра, состоял из эхо-сигнала, обусловленного комбинационным рассеянием и флуоресценцией ФП и РОВ, и фоновой засветки, вызванной отраженным от водной поверхности прямым и рассеянным атмосферной солнечного излучения. Разделение этих компонентов и выделение сигнала фоновой засветки реализовалось в спектрометре на машинном уровне: сигнал фоновой засветки регистрировался с задержкой в несколько сотен микросекунд в режиме получения полезного сигнала, но без срабатывания лазера; при такой задержке (с учетом скорости полета,  $\sim 100$  м/с, и периода изменения водной поверхности,  $\sim 0,01$  с) фоновый сигнал формировался от того же объема, что и объем, который до этого зондировался лазерным лучом, причем состояние объема за это время оставалось практически без изменения. Выделение из полезного сигнала „мешающей“ компоненты, обусловленной флуоресценцией РОВ, осуществлялось по методу вычитания „пьедестала“: принимая, что при  $\lambda = 600$  нм  $P_R \approx 0$ , а при  $\lambda = 700$  нм  $P_{\text{РОВ}} = 0$ , из суммарного сигнала при известном контуре полосы флуоресценции РОВ можно вычлесть сигнал  $P_{\text{РОВ}}$  (Фадеев, 1978; Аброскин и др., 1981).

В наших полетах обследовалась северо-восточная часть Онежского озера (рисунок). Анализ, выполненный Е.В. Станиславской, показал, что видовой состав ФП в этом районе оставался практически неизменным, это согласуется с данными Н.А. Петровой (1973) и, таким образом, свидетельствует о неизменности по траекториям лидарного зондирования величины  $\sigma_f$ . Согласно работе Э.Э. Шерман и Д.З. Ульяновой (1973), поля цветности и условной прозрачности в районах наших полетов являются в значительной мере однородными, и, следовательно, отношение  $\frac{k_L + k_R}{k_L + k_F}$  также должно сохраняться почти постоянным. Вертикальные профили  $C_{\text{Хл}_\alpha}$ , полученные контактными методами по маршруту полетов, имели максимум у поверхности и мало менялись с глубиной. Сказанное свидетельствует, что отмеченные выше условия применимости формулы (2) в ходе наших полетов выполнялись.

Анализ сравнения контактных и лидарных данных по Онежскому озеру (являющемуся олиготрофным водоемом) привел к линейной регрессионной зависимости вида

$$\langle C_{\text{Хл}_\alpha} \rangle [ \text{мг/м}^3 ] = -0,6 + 3,33 ( P_F / P_R ). \quad (4)$$

Полученное распределение поля концентраций хлорофилла (рисунок) по своему характеру хорошо согласуется с общими для этого района Онежского озера закономерностями, выявленными Пыриной и др. (1973). Очень маленькие  $C_{\text{Хл}_\alpha}$  у западного и юго-западного



Пространственные вариации концентраций хлорофилла (мкг/л) в северо-восточной части Онежского озера по данным дистанционных лидарных измерений в августе 1985 г.

по бережиям Заонежского залива (см. рисунок) ранее, насколько нам известно, контактными измерениями не обнаруживались. Сравнение с синхронными лидарному зондированию дистанционными измерениями температуры поверхности воды (выполненными А.И. Тихомировым), а также со схемой поверхностных плотностных течений, типичных в этот период (т.е. в июле-августе) в указанной части озера (Охлопкова, 1972), свидетельствует о совпадении зарегистрированных нами зон очень низкой  $C_{Хл}$  ( $< 0.2$  мкг/л) с зонами пониженной ( $< 12$  °С) температуры и замкнутых циркуляций. Это может служить естественным объяснением обнаруженной нами особенности структуры поля концентрации Хл.

Для Куйбышевского водохранилища, трофический статус которого — эвтрофный водоем, регрессионное уравнение имеет другие коэффициенты:

$$\langle C_{Хл_{\alpha}} \rangle [\text{мг/м}^3] = -1.5 + 11(P_F / P_R), \quad (5)$$

причем при  $C_{Хл_α} > 20-25 \text{ мг/м}^3$  уравнение (2) становится „нероботоспособным“.

Тот факт, что полученные для океанских акваторий и внутренних водоемов регрессионные уравнения  $\langle C_{Хл_α} \rangle = f(P_F / P_R)$  различны, является, как отмечалось выше, непосредственным следствием различий гидрооптических и гидробиологических свойств этих водных объектов. Практически это означает, что алгоритмы типа (3)–(5) должны (как минимум) создаваться индивидуально для каждого предназначенного для мониторинга водоема, а в случае существенно „лоскутчатого“ характера его гидрооптических полей – и для отдельных его районов.

### Л и т е р а т у р а

- А б р о с к и н А.Г., Г е о р г и е в Г.М., Д е в я т о в А.А. и др. Определение органических примесей в морской воде методом лазерной флуоресценции. – *Bulg. J. Phys.*, 1981, vol. 3, N 3, p. 267–273.
- Б а с л а в с к а я С.С. Фотосинтез. М., 1974. 199 с.
- Е р л о в Н.Г. Оптика моря. Л., 1980. 248 с.
- О х л о п к о в а А.Н. Течения Онежского озера. – В кн.: Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972, с. 74–113.
- П е т р о в а Н.А. Соотношение между продукцией и биомассой фитопланктона Онежского озера. – В кн.: Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973, с. 92–108.
- П ы р и н а И.Л., Е л и з а р о в а В.А., Н и к о л а е в И.И. Содержание фотосинтезирующих пигментов в фитопланктоне Онежского озера и их значение для оценки уровня продуктивности этого водоема. – В кн.: Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л., 1973, с. 108–123.
- Ф а д е е в В.В. Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов. – *Квантовая электроника*, 1978, т. 5, № 10, с. 2221–2226.
- Ш е р м а н Э.Э., У л ь я н о в а Д.З. Органическое вещество и биогенные элементы в водах Онежского озера. – В кн.: Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л., 1973, с. 175–213.
- B r i s t o w M., N i e l s e n D., B u n d y D., F u r t e k R. Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorosensor data for effects of water optical attenuation. – *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, N 17, p. 2889–2906.
- G o r d o n H.R. Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685 nm. – *Appl. Opt.*, 1979a, vol. 8, N 18, p. 1161–1166.
- G o r d o n H.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in natural waters for the remote sensing of chlorophyll-a via in vivo fluorescence. – *Appl. Opt.*, 1979b, vol. 12, N12, p. 1883, 1884.

- K o n d r a t y e v K.Ya. Radiation processes in the atmosphere. - Geneva, WMO Monogr., 1972, N309. 214 p.
- M o r e l A., P r i e u r L. Analysis of variations in ocean color. - Limnol. Oceanogr., 1977, vol. 22, N4, p. 709-732.
- N e v i l l e R.A., G o w e r J.F.R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence. - J.Geophys.Res., 1977, vol. 82, N24, p. 3487-3493.
- Y e n t s c h C.S., P h i n n e y C.M. The characterization of phytoplankton populations by the use of excitation and emission spectra. - J.Marine Res., 1984, vol. 37, N3, p. 471-484.

К.Я. Кондратьев, Г.В. Дружинин (ИНОЗ АН СССР),  
В.В. Козодеров (ОВМ АН СССР), П.П. Федченко (ВНИИСХМ),  
Ф.Т. Шумаков (ВНИИВО)

#### ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ВОДЕ НА ОСНОВЕ КООРДИНАТ ЦВЕТА

Одной из важнейших характеристик биологической продуктивности озера является содержание и пространственное распределение в его воде хлорофилла. Для определения содержания хлорофилла существует обеспечивающая достаточно высокую точность стандартная методика (Унифицированные методы..., 1975). Однако вследствие большой трудоемкости и значительных затрат времени применение этой методики, основанной на отборе и последующей обработке проб, ограничено, а результаты наблюдений за распространением хлорофилла оказываются искаженными как влиянием динамики вод, так и самим ходом развития фитопланктона, так как пробы берутся не одновременно по всей акватории водоема и не столь часто, как это необходимо. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется поиску и разработке оперативных методов определения содержания хлорофилла в озерной воде.

В предлагаемом сообщении излагаются некоторые предварительные результаты, обосновывающие дистанционный метод определения содержания хлорофилла в воде, опирающийся на применение количественной колориметрии.

Было установлено, что яркость воды сильно зависит от содержания в ней хлорофилла. Эта зависимость выражается в уменьшении яркости в синей и в увеличении яркости в зеленой зонах спектра.

Результаты наших исследований показали, что изменение содержания хлорофилла в воде всегда сопровождается изменением формы кривой спектральной яркости (т.е. изменяется спектральный состав отраженного света). На рис. 1 для примера приведены спектральные кривые отражения воды, содержащей различное количество хлорофилла.

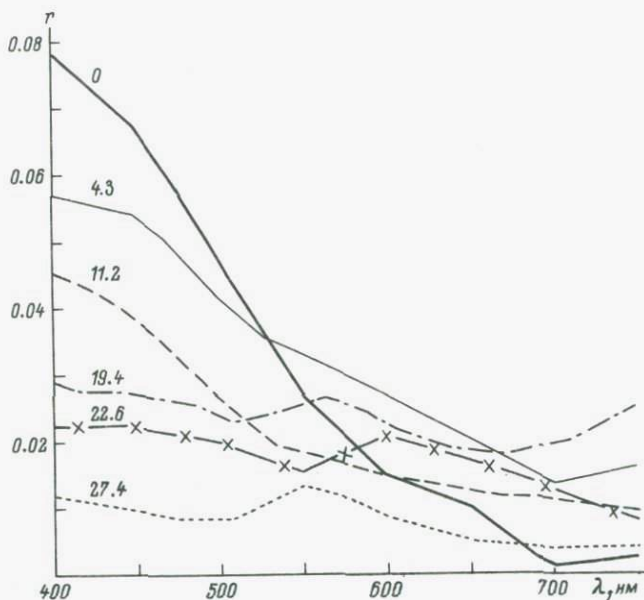


Рис. 1. КСЯ воды при различном содержании в ней хлорофилла.

Цифры у кривых — содержание хлорофилла в точках фотометрирования.

Из рисунка следует, что изменение содержания хлорофилла всегда деформирует кривую отражения. Вместе с тем изменение содержания хлорофилла не всегда сопровождается изменением коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в зеленой области спектра. Это свидетельствует о том, что, по-видимому, зависимость отношения КСЯ в синей и зеленой областях спектра от содержания хлорофилла не всегда будет его надежным индикатором, хотя многие исследователи отдают предпочтение именно этому отношению. Для этих целей надежнее использовать всю спектральную кривую отражения с нормированием ее на спектральный состав приходящего излучения. Такой подход уже был использован нами (Кондратьев, Федченко, Бармина, 1982; Кондратьев, Козодеров, Федченко, 1983) для определения содержания хлорофилла в листьях растений.

Экспериментальное опробование возможности дистанционного определения хлорофилла в воде на основе координат цвета было проведено в восточной части акватории Ладожского озера, для чего были выполнены судовые, вертолетные и самолетные измерения. В задачу судовых измерений входило построение градуировочного графика для определения содержания хлорофилла в водах Ладожского озера по результатам вертолетных и самолетных измерений. Процедура состояла в следующем. По заранее выбранному маршруту, проходившему по акватории с заведомо контрастным распределением хлоро-

филла (р. Олонка—восточное побережье Ладожского озера—р. Видли-ца), с борта научно-исследовательского судна „Бит“ были выполнены спектральные измерения. Параллельно отбирались пробы воды, в которых в тот же день определялось содержание хлорофилла по стандартной методике.

Фотометрирование осуществлялось линзовым фотометром. Монохроматизация излучения производилась с помощью интерференционных светофильтров, имеющих максимум пропускания на длинах волн 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 и 750 нм. Наблюдения всегда выполнялись при ясной погоде и высотах Солнца больше 30°, гладкой штилевой поверхности воды или легкой зыби.

Всего было выполнено 28 судовых измерений КСЯ. По полученным спектральным кривым отражения рассчитывались координаты цвета  $x, y, z$ :

$$x = k \sum_{i=1}^n S(\lambda) r(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda,$$

$$y = k \sum_{i=1}^n S(\lambda) r(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda,$$

$$z = k \sum_{i=1}^n S(\lambda) r(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda,$$

где  $k = \frac{100}{S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda}$ ;  $S(\lambda)$  — стандартный источник излучения;  $r(\lambda)$  — коэффициент спектральной яркости;  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  — удельные цветовые координаты. Затем находилась сумма координат цвета  $W = x + y + z$ . По вычисленным значениям  $W$  и содержанию хлорофилла строился градуировочный график, который в дальнейшем использовался для определения содержания хлорофилла в Ладожском озере по данным вертолетных и самолетных измерений. Преимущество использования координат цвета для решения данной задачи состоит в том, что в этом случае полностью учитывается информация, заключенная в кривой спектрального отражения.

После построения градуировочной кривой были выполнены совместные вертолетные и судовые измерения. В задачу судовых наблюдений входит отбор проб с последующим определением в них содержания хлорофилла. Вертолетные наблюдения предусматривали измерения КСЯ над точками отбора проб и определение содержания хлорофилла по заранее построенной градуировочной кривой.

Наблюдения проводились в районе о-ва Мантсинсари (северо-восточная часть Ладожского озера). На рис. 2 показан маршрут и приведены точки измерений.

Сопоставление результатов показывает, что сходимость данных вполне удовлетворительна. Это дает основания для вывода о перс-

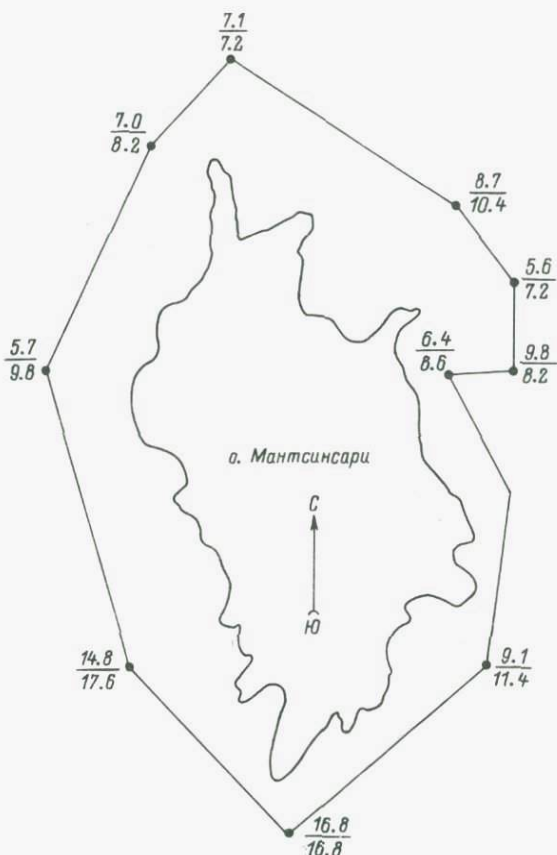


Рис. 2. Маршрут и точки судово-вертолетных измерений.

Цифры у точек — содержание хлорофилла по данным судовых (числитель) и вертолетных (знаменатель) измерений.

пективности дистанционного метода определения содержания хлорофилла в воде с применением колориметрического показателя координат цвета.

#### Л и т е р а т у р а

Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Опыт определения содержания гумуса в почвах по данным аэрокосмических измерений. — ДАН СССР, 1983, т. 268, № 4, с. 973–975.

Кондратьев К.Я., Федченко П.П., Бармина Ю.М. Опыт определения содержания хлорофилла в листьях

растений по цветовым координатам. — ДАН СССР, 1982, т. 262, № 4, с. 1022–1024.

У н и ф и ц и р о в а н н ы е методы исследования качества вод. Ч. III. Методы биологического анализа вод. М., 1975. 230 с.

О.Е. Короткевич, Л.Ф. Барышева (ИНОЗ АН СССР),  
А.А. Шавыкин, С.С. Старун, В.И. Черноок (ПИНРО)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ОНЕЖСКОМ ОЗЕРЕ С ПОМОЩЬЮ БЕЗЭКСТРАКТНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МЕТОДИКИ

В настоящей работе рассматриваются результаты практического использования флуоресцентной экспресс-методики на Онежском озере. Вопрос резкого увеличения количества и скорости получения результатов измерений содержания хлорофилла в озерных водах становится чрезвычайно актуальным в настоящее время. Одна из причин этого — необходимость получения информации, достаточной для обеспечения дешифрирования результатов дистанционных наблюдений в масштабе времени, соответствующем этим дистанционным наблюдениям. Вторая причина заключается в необходимости исследования структуры полей распределения фитопланктона и их динамики в пространстве и времени. Для этого необходимо резко увеличить скорость проведения измерений и получения результатов по сравнению с обычно применяемыми в лимнологии методами исследований содержания хлорофилла. Такую возможность предоставляет безэкстрактная флуоресцентная методика (Шавыкин, 1983).

Измерения на Онежском озере проводились в ходе выполнения комплексной съемки по стандартной сетке станций (рис. 1). Пробы воды отбирались из поверхностного слоя. Измерялись интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo* и флуоресценции фона (филтрат). Для каждой пробы вычислены средние величины интенсивностей флуоресценции и ошибки этих средних. Все измерения проводились после добавления в пробу диурона. Методика и применяемая аппаратура рассматриваются в статье Шавыкина и др. (наст. сб., с. 129–139).

Одновременно проводились измерения ряда других гидрофизических характеристик озерных вод. При этом температура, удельная электропроводность и прозрачность воды измерялись *in situ* с помощью комплекса малоинерционных систем с непрерывной регистрацией результатов. Точность измерений температуры  $0,1^\circ\text{C}$ , электропроводности  $0,5 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$ , прозрачности 3%.

Результаты обработки измерений представлены на рис. 2, 3. Для поверхностного горизонта показаны распределения: концентраций хлорофилла „ $\alpha$ “, средних квадратических отклонений этих величин в каждой пробе, интенсивности флуоресценции фона — филтрата озерной воды (рис. 2). Последняя величина для более ясного вос-

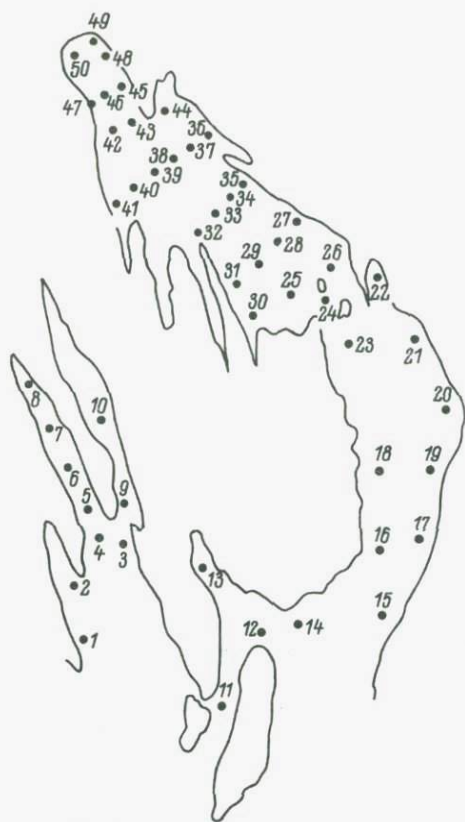


Рис. 1. Схема расположения станций.

приятия также дана в единицах концентрации хлорофилла "α". Фактически интенсивность флуоресценции фона, пересчитанная в концентрации хлорофилла, может рассматриваться как возможная систематическая ошибка в определении последнего при отсутствии определений фона.

Исследования распределения величин физико-химических характеристик вод позволили выделить водные массы различного происхождения и состава и провести интерпретацию результатов флуоресцентного анализа. При этом выявилась необходимость комплексной интерпретации данных, так как содержание хлорофилла неоднозначно связано с величинами указанных характеристик и в то же время хорошо связано с выделенными водными массами.

По комплексу указанных характеристик были выделены озерные воды северо-западной части Онежского озера, воды Кижского фарватера и Малого Онего, воды Повенецкого залива, трансформированные придонные воды восточной части Малого Онего, воды отдельных губ северной части Онежского озера, воды апвеллинга в Лижемской губе и воды Челмужской губы.

Общая картина распределения концентраций хлорофилла "α" на этой акватории характерна для летнего сезона (Петрова, 1971) и в основном соответствует выделенным водным массам (рис. 3, а). Наиболее низкие его концентрации связаны с зонами апвеллинга (Лижемская губа и частично восточная часть Малого Онего). Особенно ярко это проявляется в Лижемской губе, где концентрации хлорофилла "α" составляют 0,2–0,6 мкг·л<sup>-1</sup>. В основной части Малого Онего, Кижском фарватере и центральной части Повенецкого залива наблюдались значительно большие его концентрации — до 2,8–3,3 мкг·л<sup>-1</sup>. Особенно высокие концентрации — от 4 до 5 мкг·л<sup>-1</sup> — соответствуют хорошо прогретым мелководным губам и периферийным частям Повенецкого залива. В то же время связь температуры с распределением фитопланктона неоднозначна, особен-

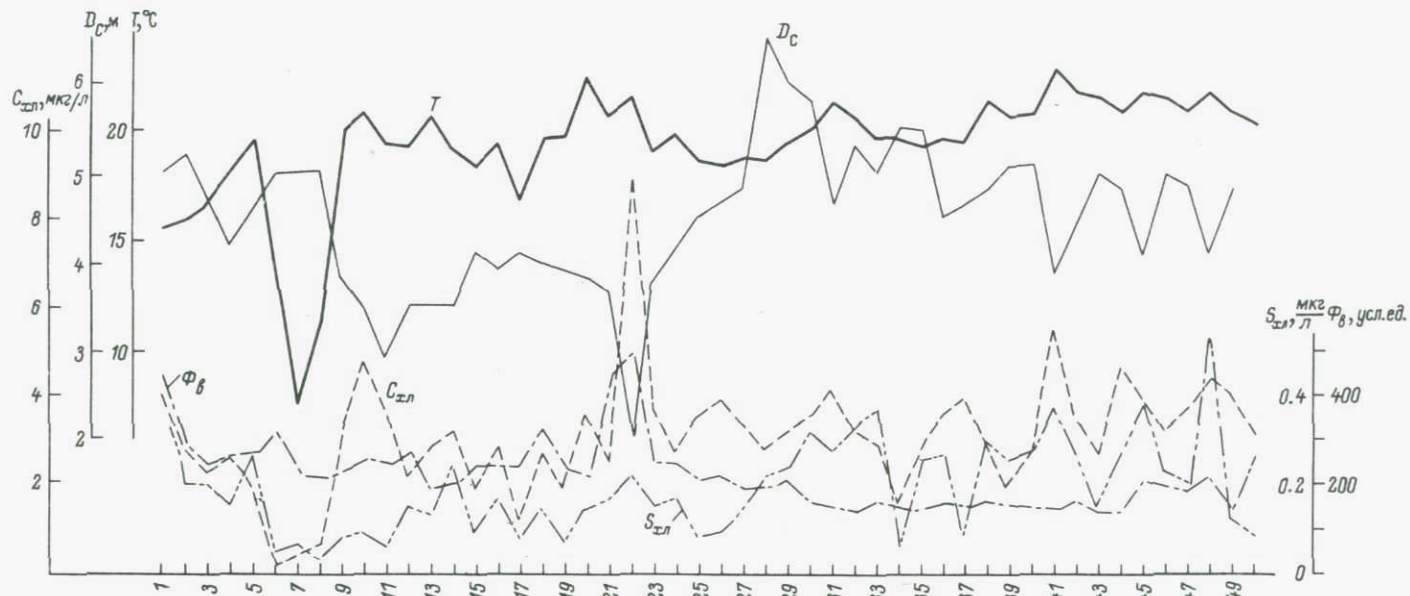


Рис. 2. Распределение физико-химических характеристик онежских вод и величин, полученных флуоресцентным методом, по станциям.

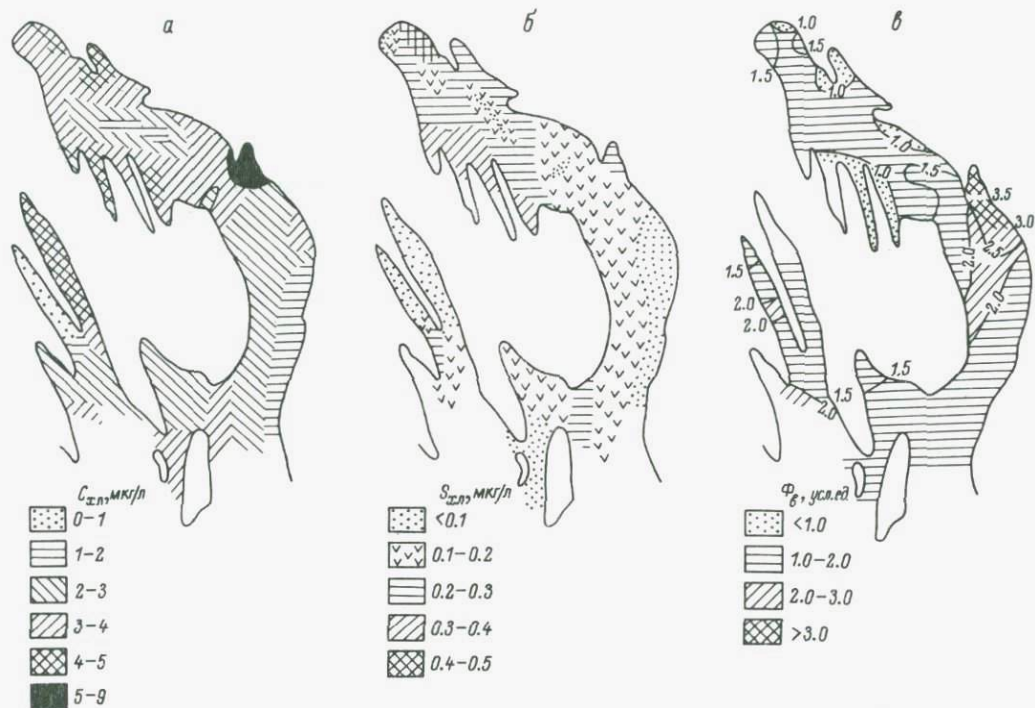


Рис. 3. Распределение концентраций хлорофилла "а" в поверхностном слое вод (а), средней квадратической ошибки определений концентраций хлорофилла "а" в каждой пробе (б) и фоновых величин интенсивности флуоресценции воды (в).

но в Повенецком заливе. Максимальные концентрации хлорофилла „а“ отмечены в Челмужской губе — единственном районе, где они превышают  $7 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ , достигая  $8,9 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Кроме быстрого получения подробной картины распределения величин концентраций хлорофилла экспресс-метод позволил выявить ряд других особенностей распределения фитопланктона и фоновых величин интенсивности флуоресценции озерных вод.

Результатом непосредственной автоматической обработки каждой пробы, кроме средней концентрации хлорофилла, является дисперсия измерений или средняя квадратическая ошибка. Картирование средних величин дает, как было показано выше, зоны с различными концентрациями хлорофилла, В то же время оказалось возможным картировать и величины средней квадратической ошибки средних значений; эти величины на два порядка превышают аппаратную ошибку, что позволяет использовать их для получения дополнительной информации о характере распределения клеток фитопланктона в озерных водах.

Картирование средней квадратической ошибки средних значений и сравнение полученного распределения с картой величин концентраций хлорофилла показывают, что по этой характеристике также наблюдаются существенные различия между Повенецким заливом и остальной частью Онежского озера (рис. 3, б). В то же время между зонами величин концентраций и зонами их средних квадратических ошибок наблюдаются и весьма существенные различия. Так, величины концентраций в северо-западных губах и прилегающей к ним части Онежского озера изменяются от  $0,2 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$  в Лижемской губе до  $4,8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$  в Уницкой губе (рис. 3, а), охватывая почти весь (за исключением Челмужской губы) диапазон изменения этой характеристики в исследованном районе. В то же время средняя квадратическая ошибка в этом районе колеблется от  $0,03$  до  $0,21 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ , изменяясь сравнительно слабо и практически не отличаясь от района Кижского фарватера и Малого Онего ( $0,01$ – $0,23 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ ). В Повенецком заливе при сравнительно больших различиях в количествах хлорофилла „а“ колебания величины ошибки средних значений также невелики ( $0,05$ – $0,39 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ ). Существенными отличиями этих двух крупных районов друг от друга являются различия в средних величинах средней квадратической ошибки ( $0,12$  и  $0,23 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$  соответственно). Это свидетельствует о качественной однородности хлорофиллсодержащих организмов в каждом из указанных районов и об отличии этих районов друг от друга.

Проведенные исследования не позволяют в настоящее время однозначно связать величины дисперсии (ошибок среднего) с видовым составом фитопланктона, но, учитывая характер распределения в воде основных групп фитопланктона, можно предположить наличие относительно больших количеств сине-зеленых организмов в районе Повенецкого залива во время съемки. Дальнейшие исследования с одновременным изучением видового состава позволят более обоснованно ответить на этот вопрос. В случае положительного ответа

это даст возможность распространять результаты немногочисленных и очень трудоемких определений видового состава фитопланктона во время съемки по сетке станций на определенные области, прилегающие к этим станциям.

Учет фоновых величин интенсивности флуоресценции воды является, как было показано в результате проведенных методических исследований, обязательным при исследовании озерных вод (Шавыкин и др., наст. сб., с. 129–139). Особенно остро этот вопрос встает при внедрении непрерывнодействующих проточных систем. Одной из задач съемки было определение реальных амплитуд колебания этой характеристики как для всего района в целом, так и для отдельных его частей. Исследования величин фоновой флуоресценции показали сравнительную их однородность по всей территории, несколько большую в северо-западных губах и Малом Онего и меньшую в Повенецком заливе (рис. 3, в). Резко выделяются высокими фоновыми значениями лишь район Челмужской губы и прилегающая к нему акватория ввиду аномально высоких содержаний в этом районе растворенного органического вещества (Шерман, Ульянова, 1973).

В результате исследований, проведенных с помощью флуоресцентной экспресс-методики, получена картина распределения хлорофилла „а“ в реальном масштабе времени.

Рассматриваются возможности использования величин средне-квадратической ошибки серий измерений в пробе для получения представления о качественных особенностях состава фитопланктона.

Определены фоновые величины флуоресценции вод Онежского озера и распределение их по отдельным районам. Полученные результаты позволяют в дальнейшем применять флуоресцентную методику в режиме непрерывных измерений на ходу судна.

#### Л и т е р а т у р а

- Петрова Н.А. Фитопланктон Онежского озера. — В кн.: Растительный мир Онежского озера. Л., 1971, с. 88–120.
- Шавыкин А.А. О методике количественного определения хлорофилла „а“ в морском фитопланктоне. — В кн.: Исследования биологии, морфологии и физиологии гидробионтов. Апатиты, 1983, с. 28–34.
- Шавыкин А.А., Степин С.Б., Старун С.С., Короткевич О.Е., Шумаков Ф.Т. Некоторые вопросы применения флуоресцентной методики для экспрессного определения хлорофилла во внутренних водоемах. Наст. сб., с. 129–139.
- Шерман Э.Э., Ульянова Д.З. Органическое вещество и биогенные элементы в водах Онежского озера. — В кн.: Гидрохимия Онежского озера и его притоков, Л., 1973, с. 175–212.

А.А. Шавыкин, С.Б. Степин, С.С. Старун (ПИНРО),  
О.Е. Короткевич (ИНОЗ АН СССР), Ф.Т. Шумаков (ВНИИВО)

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗЭКСТРАКТНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА ВО ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ

Объем измерений различных параметров внутренних водоемов, необходимых для разных целей, в том числе и для расшифровки данных дистанционных методов, из года в год возрастает. Это приводит ко все более широкому использованию экспрессных методов, в частности и при определении содержания хлорофилла в водной среде. Именно поэтому концентрацию хлорофилла в воде целесообразно определять безэкстрактным методом, основанным на измерении интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* при добавлении в пробу диурона (Slovaček, Hannan, 1977; Шавыкин, 1983). В настоящей работе на основе натуральных измерений анализируются особенности этого метода при его использовании на внутренних водоемах.

Измерения были выполнены на двух крупных озерах Северо-Запада СССР — Ладожском и Онежском. Методика флуоресцентных измерений, примененная нами, была аналогична описанной в работе А.А. Шавыкина (1983), но использовалась при этом более совершенная аппаратура. По результатам параллельных спектрофотометрических и флуориметрических измерений определялось градуировочное уравнение „концентрация хлорофилла—интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo*“. В работе обсуждается метод расчета этого уравнения. Анализируются также результаты повторных измерений проб и полученные данные по кинетике интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона. Рассматривается влияние фона (фильтра озерной и речной воды) на точность конечного результата.

И с п о л ь з у е м а я   а п п а р а т у р а,  
М е т о д и к а   и з м е р е н и й

### 1. Измерение флуоресценции проб

Для определения флуоресценции использовался флуориметр „Квант“, модернизированный в ПИНРО. Модернизация заключалась в полной замене электронной части прибора и подключении для измерения и автоматического выполнения расчетов микрокалькулятора марки „Электроника МК-64“. Флуоресценция возбуждалась модулированным (150 Гц) световым потоком от лампы КГМ-12-100 через первичные светофильтры типа СЗС-22 и СС-5. Максимум спектральной полосы возбуждающего светового потока — 430 нм, его ширина по уровню

0,5 от максимума — 100 нм. Флуоресценция регистрировалась с помощью фотоумножителя ФЭУ-61 через обрезавший светофильтр КС-15, который пропускает свет с длиной волны  $>650$  нм. Угол между возбуждающим световым потоком и направлением регистрации флуоресценции составлял  $90^\circ$ . Сигнал флуоресценции после преобразования на фотоумножителе ФЭУ-61 и усиления подавался на вход микрокалькулятора „Электроника МК-64“. Режим измерения: регистрируются 10 отсчетов с интервалом между ними 10 с, автоматически вычисляются среднее значение и ошибка этого среднего. Такой режим обусловлен тем, что сигнал флуоресценции не постоянен во времени и может изменяться в несколько раз (и даже на порядок величины) за несколько десятков секунд. Такое изменение интенсивности флуоресценции во времени объясняется дисперсностью флуоресцирующего объекта. Предварительная оценка интервала корреляции для проб с клетками морского фитопланктона (5–20 с) считалась справедливой и для проб фитопланктона внутренних водоемов. Порядок измерения был следующим: последовательно определялись чувствительность прибора по внутреннему эталону (по каналу сравнения), интенсивность флуоресценции пробы воды со взвешенными клетками фитопланктона и затем интенсивность флюоресценции — воды без клеток фитопланктона (по каналу измерения). Равенство чувствительности каналов измерения и сравнения периодически (раз в 1–2 ч) контролировалось по стеклу ЖС-3, устанавливаемому в канале измерения вместе кюветы. В пробу непосредственно перед измерением добавляли 0,2 мл раствора диурона. Конечная концентрация диурона в пробе составляла  $10^{-5}$  М. Отбираемый объем пробы для анализа — 5 мл, непосредственно флуориметрируемый объем — 1,5 мл.

## 2. Получение фильтрата

Фильтрат в объеме 10–15 мл получали на специальной фильтровальной установке, где использовались фильтры типа „Владипор“ № 6 диаметром 35 мм с размером пор 0,75–0,85 мкм. Первая порция фильтрата выливалась. Чистота фильтровальной установки периодически проверялась по дистиллированной воде, для чего флуоресценция дистиллированной воды измерялась до и после ее прохождения через всю фильтровальную установку. Установка считалась чистой, если интенсивность флуоресценции дистиллированной воды возрастала не более чем на 10–15 единиц. С учетом величины интенсивности флуоресценции фильтрата (200–400 усл. ед.) это соответствует возможной ошибке измерения интенсивности флуоресценции фильтрата не более чем 2–5%.

## 3. Измерение концентрации хлорофилла спектрофотометрическим методом

Концентрацию хлорофилла „а“ определяли по стандартной методике (Руководство..., 1983). Воду объемом 0,25–1,0 л профильт-

тровывали через такие же фильтры типа „Владипор“, которые использовались для получения фильтрата. Хлорофилл экстрагировали 90%-ным ацетоном, полученный экстракт центрифугировали в течение 15 мин при 3000 об/мин и на спектрофотометре „Спекол-10“ измеряли поглощение на четырех длинах волн (630, 645, 663 и 750 нм). Для измерения поглощения использовали 5-сантиметровую кювету. По полученным данным вычисляли концентрацию хлорофилла „а“, „b“ и „с“ в воде (Руководство..., 1983).

## Результаты и обсуждение

### 1. Градуировочное уравнение

Применение флуоресцентного метода требует градуировки прибора. Для построения градуировочного уравнения необходимо использовать данные, полученные в ходе натурных измерений. Возможно, что для определения концентрации хлорофилла потребуется обработка собранных проб в лаборатории на берегу. Кроме того, периодически необходимо проводить уточнение уже имеющегося градуировочного уравнения. В силу этих двух обстоятельств результаты флуоресцентных измерений будут первоначально выражаться не в единицах концентрации, а в условных единицах.

Сложность изучаемого объекта — хлорофилла живых клеток фитопланктона — и малое количество данных о применимости рассматриваемого флуоресцентного метода для определения этого пигмента не позволяют еще с уверенностью утверждать, что диурон — универсальное средство, снижающее зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* от всех факторов (Lorenzen, Jeffrey, 1980). Существует, по-видимому, фактор, влияние которого на отношение интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* — концентрация хлорофилла „а“ добавлением в пробу диурона не снижается. Таким фактором может быть, например, различная концентрация молекул хлорофилла в единице объема клетки, а точнее — в единице объема хлоропласта. Другими словами, это различная пространственная организация молекул пигмента, которая приводит к различной степени миграции энергии возбуждения между молекулами пигментов и различной степени затенения одних молекул другими.

Вместе с тем пробы фитопланктона, собранные в разных местах или даже с разных горизонтов, содержат клетки фитопланктона нескольких (иногда десятков) видов, имеющих самую разнообразную внешнюю форму и неодинаковую структуру хлоропласта. Таким образом, действие диурона как универсального средства требует еще тщательной проверки. Поэтому в настоящее время для построения градуировочного уравнения целесообразнее использовать пробы, отобранные в естественных условиях, считая, что они в большей мере представляют все разнообразие фитопланктона по его внутренней структуре и другим факторам, возможно еще не учитываемым, чем пробы, приготовленные специальным способом (разбавление или концентрирование).

Очень трудно также подобрать около двух десятков проб со значениями концентрации хлорофилла ( $C_{\text{хл}}$ ) или интенсивности флуоресценции хлорофилла, измеренной в присутствии диурона ( $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ ), меняющимися на определенную величину, причем так, чтобы этот ряд проб покрывал весь диапазон изменения  $C_{\text{хл}}$  или  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ . Приходится поэтому периодически отбирать пробы для параллельного анализа по двум методикам: флуоресцентной и спектрофотометрической, контролируя, чтобы был перекрыт весь требуемый диапазон изменения этих величин.

Кроме того, ни интенсивность флуоресценции хлорофилла „ $\alpha$ “, ни концентрация хлорофилла не могут считаться измеренными точно. Пример величины ошибок определения  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  (90%-ные доверительные интервалы) показан на рис. 1. Концентрация хлорофилла, определяемая спектрофотометрическим методом, может иметь ошибку, вероятно, не менее 10–20%. Это свидетельствует о том, что сам спектрофотометрический метод требует доработки (Lorenzen, Jeffrey, 1980; Rai, 1980).

Таким образом, при построении градуировочного уравнения „концентрация хлорофилла „ $\alpha$ “ – интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo*“ ни одна из величин не контролируется, т.е. не представляет собой заранее определяемые постоянные и, кроме того, измеряется с ошибкой. Это обстоятельство не позволяет применять для расчета параметров градуировочного уравнения широко распространенный метод наименьших квадратов (Закс, 1976; Себер, 1980).

Один из возможных методов расчета градуировочного уравнения, который может быть применен в указанной ситуации, – это метод Керриша (Закс, 1976; Kerrick, 1966). Если обе переменные содержат ошибки и облако точек прилегает к прямой, проходящей через начало координат ( $y = bx$ ), то для оценивания параметра  $b$  по  $n$  независимым парам значений ( $x, y$ ) рассчитывают разности  $d_i = \lg y_i - \lg x_i$ ; среднее значение  $\bar{d}$  и стандартное отклонение  $S\bar{d} = \sqrt{\sum (d_i - \bar{d})^2 / n(n-1)}$ . 90%-ный доверительный интервал для  $S\bar{d}$  будет равен

$$\lg b \pm S\bar{d} \cdot t_{n-2; 0.10} / \sqrt{n},$$

где  $t_{n-2; 0.10}$  – коэффициент распределения Стьюдента.

Для построения градуировочного уравнения было отобрано 16 проб. Место отбора проб – Онежское озеро, р. Свирь, устья рек Оять, Паша, Сясь, Валгомка.

Регрессионное уравнение „концентрация хлорофилла „ $\alpha$ “ – интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo*“, рассчитанное методом Керриша, имеет вид:

$$C_{\text{хл}} = b_1 \Phi_{\text{хл}}^{\text{д}},$$

$b_1 = 7.08 \cdot 10^{-3}$  мг·м<sup>-3</sup>·усл.ед.<sup>-1</sup>, 90%-ный доверительный интервал для  $b_1$  равен  $6.86 \cdot 10^{-3}$ – $7.31 \cdot 10^{-3}$ .

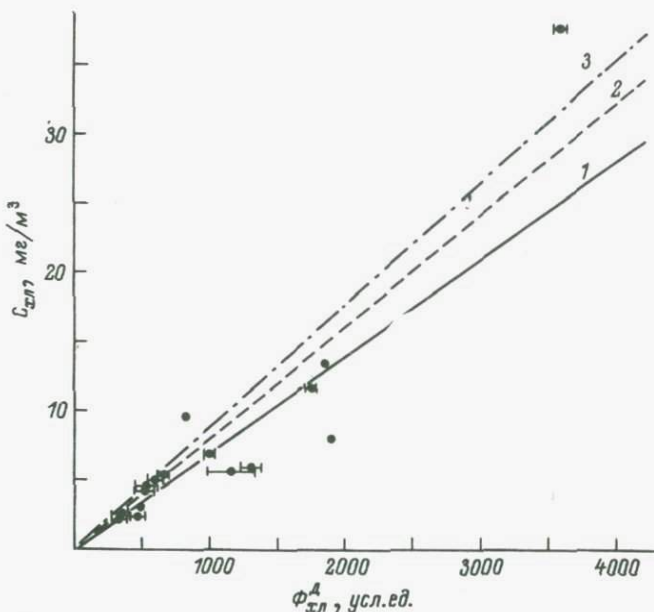


Рис. 1. Результаты параллельного измерения концентрации хлорофилла спектрофотометрическим методом ( $C_{\text{хл}}$ ) и интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона ( $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ ).

Показаны 90%-ные доверительные интервалы для средних значений флуоресценции, большие 30 усл. ед.

1 - линия регрессии, рассчитанная методом Керриша; линии регрессии, рассчитанные методом наименьших квадратов: 2 - регрессия  $C_{\text{хл}}$  по  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ ; 3 - регрессия  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  по  $C_{\text{хл}}$ .

Здесь  $C_{\text{хл}}$  - концентрация хлорофилла "а", определяемая спектрофотометрическим методом;  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  - интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона.

Интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo* принималась равной разности интенсивности флуоресценции пробы со взвешенным фитопланктоном ( $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ ) и фильтрата ( $\Phi_{\text{в}}^{\text{д}}$ ), т.е.  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}} = \Phi^{\text{д}} - \Phi_{\text{в}}^{\text{д}}$ . Все измерения проводились после добавления в пробу диурона.

Таким образом, в регрессионном уравнении  $C_{\text{хл}} = f(\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}})$  свободного члена быть не должно, т.е. для расчетов необходимо принимать именно модель  $y = bx$ , а не  $y = a + bx$ . Как следует из рис. 1, для значений  $C_{\text{хл}}$  и  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  выполняется также условие, необходимое для правильного применения метода Керриша: значения  $\lg y_i$  и  $\lg x_i$  распределены приблизительно по нормальному закону. На этом же рисунке показаны прямые  $C = b \cdot \Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ , рассчитанные методом наименьших квадратов. Прямая 2 соответствует регрессии  $C_{\text{хл}}$  по  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ . Она могла бы быть принята за градуировочное уравнение, если бы

флуоресценция  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  не была случайной величиной и наблюдалась без ошибок:

$$C_{\text{хл}} = b_2 \cdot \Phi_{\text{хл}}^{\text{д}};$$

$b_2 = 8.14 \cdot 10^{-3}$  мг·м<sup>-3</sup>·усл.ед.<sup>-1</sup>, 90%-ный доверительный интервал для  $b_2$  равен  $7.31 \cdot 10^{-3}$ – $8.97 \cdot 10^{-3}$ . Число точек – 16, оснований для исключения какой-либо из них нет. Прямая 3 соответствует регрессии  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  по  $C_{\text{хл}}$ , ее можно было бы использовать для получения градуировочного уравнения, если бы концентрация хлорофилла „а“ не была случайной величиной и наблюдалась без ошибок:

$$\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}} = \frac{1}{b_3} \cdot C_{\text{хл}},$$

$$\frac{1}{b_3} = 112.0.$$

Для зависимости  $C_{\text{хл}} = f(\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}})$  эта регрессия принимает вид:

$$C_{\text{хл}} = b_3 \cdot \Phi_{\text{хл}}^{\text{д}};$$

$b_3 = 8.93 \cdot 10^{-3}$  мг·м<sup>-3</sup>·усл.ед.<sup>-1</sup>, 90%-ный доверительный интервал для  $b_3$  равен  $7.83 \cdot 10^{-3}$ – $10.39 \cdot 10^{-3}$ .

Здесь также число точек – 16, оснований для исключения какой-либо пары значений нет.

Необходимо добавить, что предварительная проверка на значимое отличие свободного члена модели  $y = a + bx$  показала, что свободный член и для регрессии  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  по  $C_{\text{хл}}$  значимо не отличается от нуля. Коэффициент линейной корреляции 0.92, коэффициент детерминации 0.85.

Соотношения между численными значениями величин  $b_i$  следующие:  $b_2$  больше  $b_1$  на 15%,  $b_3$  превосходит  $b_1$  на 26%. Следовательно, ошибки в оценках  $C_{\text{хл}}$  по  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  могли быть в данном случае также при выборе для расчета градуировочного уравнения метода наименьших квадратов вместо метода Керриша. Сравнение 90%-ных доверительных интервалов подтверждает значимое отличие  $b_1$  от  $b_2$  и  $b_3$ .

Таким образом, на основе натуральных данных для флуориметра „Квант“ рассчитано градуировочное уравнение „концентрация хлорофилла „а“ – интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo*“. Обосновано применение метода Керриша вместо метода наименьших квадратов. Сравнение рассчитанного уравнения с уравнениями, полученными методом наименьших квадратов, говорит об их значимом отличии на уровне  $\alpha = 0.10$  и завышении величины  $C_{\text{хл}}$ , оцениваемой по  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$ , на 15–26% при использовании метода наименьших квадратов вместо метода Керриша для расчета градуировочного уравнения.

## 2. Определение степени репрезентативности пробы

Один из вопросов, возникающих при измерениях концентрации хлорофилла безэкстрактным флуоресцентным методом, состоит в оп-

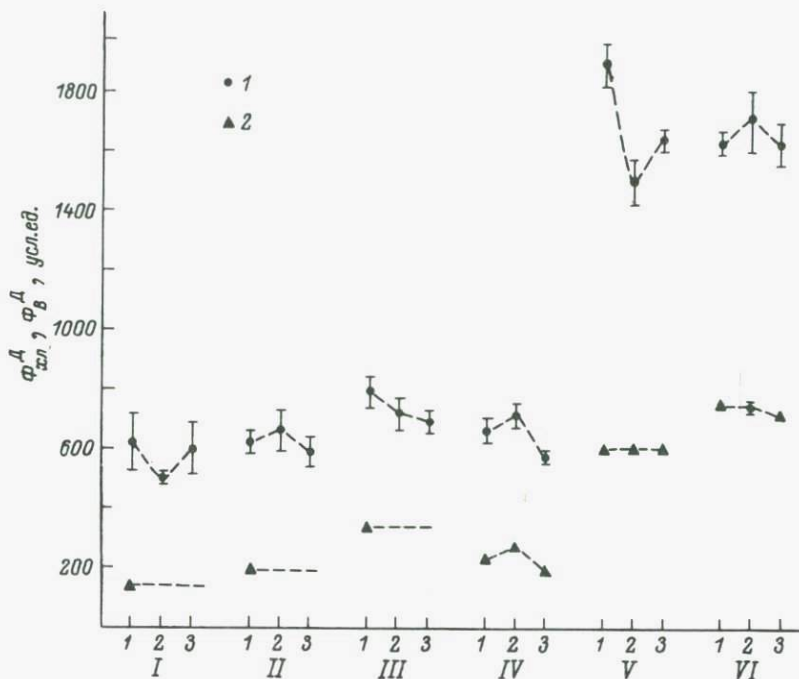


Рис. 2. Результаты повторных измерений проб на шести станциях.

1 — интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона ( $\Phi_{\text{хл}}^{\text{Д}}$ ); 2 — интенсивность флуоресценции фильтрата в присутствии диурона ( $\Phi_{\text{в}}^{\text{Д}}$ ). Римские цифры на оси абсцисс — номер серии, арабские — номер измерения в данной серии. Показаны 90%-ные доверительные интервалы, больше 10 усл. ед.

ределении минимального флуориметрируемого объема пробы. При использовании спектрофотометрического метода клетки фитопланктона осаждаются на фильтр из объема примерно 1 л (в бедных водах этот объем составляет 5–10 л). Такой объем в основном однозначно отражает исследуемую водную среду с точки зрения содержания в ней хлорофилла. Для флуоресцентного метода, с учетом его чувствительности, достаточно и нескольких миллилитров воды. Но будет ли концентрация хлорофилла в этом объеме соответствовать средней концентрации хлорофилла в исследуемой среде? Для ответа на такой вопрос необходимо (хотя бы ориентировочно) знать концентрацию клеток фитопланктона различных видов и особенно клеток с большим содержанием хлорофилла. И в оптимальном случае измеряемый объем должен быть таким, чтобы приблизительно верно отражать концентрацию крупных клеток фитопланктона в изучаемой среде. Незнание этого критического объема и использование другого, много меньшего, не позволит правильно определить концентрацию

хлорофилла. С другой стороны, сопоставление минимального критического объема с реальным, используемым в конкретном приборе, и знание (хотя бы приблизительное) видового состава фитопланктона, обитающего в водной среде, позволило бы оценить возможную ошибку и тем самым указать правильный доверительный интервал для результатов измерений концентрации хлорофилла.

Поскольку на данном этапе мы не имеем возможности провести такую работу, оценка того, насколько правильно объем пробы в 5 мл (при флуориметрируемом объеме 1,5 мл) отражает исследуемую среду, была сделана нами приближенно и несколько иначе.

Отбирались пробы объемом 0,5 л, из этого объема трижды наливались пробы непосредственно в кювету, и проводились измерения по изложенной выше методике. Результаты представлены на рис. 2.

В первых трех сериях (I—III) флуоресценция фильтрата измерялась один раз, в последних (III—У1) — трижды: каждый раз получался новый фильтрат, который затем флуориметрировался. Чтобы сравнить результаты измерений внутри серии, использовалось положение, сформулированное в работе Закса (1976): „Сравнение двух параметров возможно на основании их доверительных интервалов: 1) если доверительные интервалы перекрываются частично, то из этого следует, что параметры различаются незначимо; 2) если доверительные интервалы не перекрываются, между параметрами имеется значимая разница“. В одной из шести серий (серия У) все три измерения значимо отличны друг от друга. Для серии 1У, выполненной в п. Суйсарь, наблюдается значимое различие между одним третьим измерением и двумя предыдущими. В двух случаях (серии I и III) строго различны между собой на данном уровне значимости два из трех измерений. На двух станциях (серии II и У1) различия, по-видимому, нет, так как не только перекрываются доверительные интервалы, но и сами средние значения первого и последнего измерений попадают в доверительный интервал результата второго измерения. При сопоставлении средних использованы 90%-ные доверительные интервалы.

На основании различия отдельных повторных измерений можно заключить, что в некоторых случаях результаты приведенных измерений не в полной мере отражают реальное содержание хлорофилла в водной среде. Самой характерной в этом отношении является одна из шести серий (Rai, 1980). Как нам представляется, наиболее вероятная причина этого — недостаточная величина флуориметрируемого объема. Необходимо провести более тщательный анализ влияния этой величины на результаты определения, привлекая данные видового состава фитопланктона измеряемых проб.

Следует также отметить, что фильтрат воды большинства внутренних водоемов дает примерно в 10–20 раз большую величину интенсивности флуоресценции по сравнению с фильтратом морской воды. Измерения в Баренцевом море на этом же приборе и при абсолютно тех же условиях дали значения интенсивности флуоресценции фильтрата только в диапазоне 6–30 усл.ед. при изменении суммарной флуоресценции ( $\Phi_{\Sigma Д}$ ) в диапазоне 10–2000 усл.ед. Для приведенных шести станций внутренних водоемов (рис. 2) интенсивность флуорес-

ценции фильтрата меняется от 137 до 747 усл.ед. Большое значение интенсивности фильтрата для внутренних водоемов по сравнению с фильтратом морских вод объясняется тем, что в водах внутренних водоемов растворено большее количество органических веществ. Этот факт указывает на необходимость обязательного контроля фона при определении концентрации хлорофилла по интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo*. Ранее это отмечалось С.Г. Карабашевым (1971).

### 3. Кинетика интенсивности флуоресценции хлорофилла в присутствии диурона

Измерение концентрации хлорофилла по интенсивности флуоресценции *in vivo* описанным в данной работе способом сводится к определению среднего значения нескольких отсчетов флуоресценции и пересчету полученной величины в единицы концентрации. При этом важно решить следующие вопросы: какой может и должна быть общая продолжительность измерения, сколько всего необходимо сделать отсчетов и чему равен временной интервал между ними. Здесь мы подробно остановимся на первом из перечисленных выше вопросов. Два последних — тема специальной статьи, и, как уже отмечалось, предварительный ответ на них таков: в ходе одного измерения необходимо сделать около 10 отсчетов с интервалом между ними приблизительно 10 с.

Для уточнения максимально допустимой продолжительности выполнения измерений необходимо знать, как изменяется во времени интенсивность флуоресценции хлорофилла *in vivo* после добавления в пробу диурона. Результаты таких измерений представлены на рис. 3. Первое измерение выполнялось обычным способом: в кювету наливалась проба, добавлялся диурон, проба флуориметрировалась. После этого проба не выливалась и в течение 2–3 ч измерялась с интервалами между измерениями 15–30 мин. Всего выполнено три серии таких измерений. Для каждой из них определялась флуоресценция фильтрата. На рис. 3 эта величина показана штриховой линией. Из полученных данных видно, что максимальное значение  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  соответствует начальному моменту времени  $t=0$ . Следует уточнить, что в действительности между добавлением в пробу диурона и первым снятием отсчета проходит 20–40 с. Кроме того, каждое измерение длится 1,5 мин. С течением времени флуоресценция уменьшается, причем в первые 30–60 мин сравнительно быстро, а затем скорость ее уменьшения снижается. Наибольший интерес в данном случае представляет начальный участок кривой. За первые 30 мин. величина  $\Phi_{\text{хл}}^{\text{д}}$  — интенсивность флуоресценции хлорофилла фитопланктона — снижается на 38, 17 и 14% для серий I, II и III. За 1 мин интенсивность флуоресценции уменьшается соответственно на 1,3, 0,6 и 0,5%. В среднем интенсивность флуоресценции после добавления в пробу диурона уменьшается на величину, примерно равную 1%. Отсюда можно сделать следующий вывод: если считать, что за время измерения интенсивность флуоресценции не должна

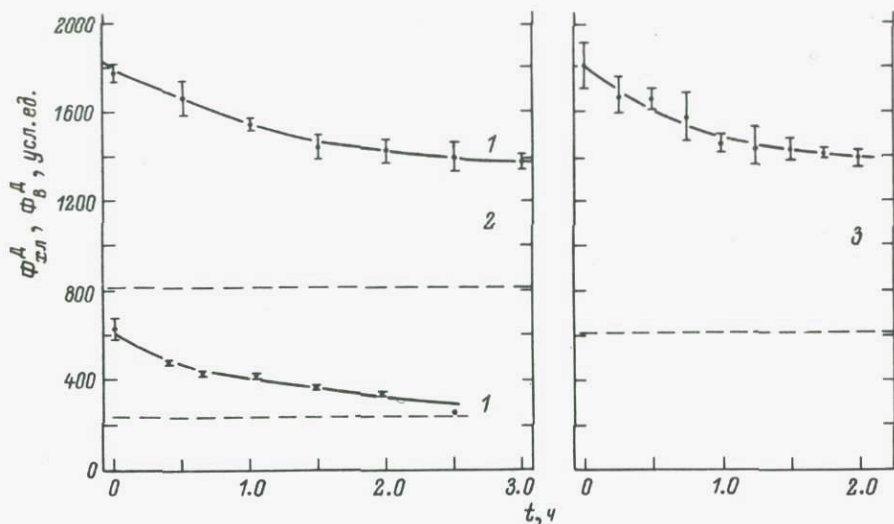


Рис. 3. Кинетика интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона.

Штриховые линии — интенсивность флуоресценции фильтрата, 1–3 — номера серий измерений. Показаны 90%-ные доверительные интервалы.

уменьшиться больше, чем на 3–5% от начального максимального значения, то общее время измерения не должно превышать 3–5 мин.

#### Выводы

Таким образом, на основании обсуждения результатов и некоторых вопросов применения на внутренних водоемах метода определения концентрации хлорофилла по интенсивности флуоресценции в присутствии диурона можно сделать следующие выводы.

1. Для градуировки флуориметра с использованием спектрофотометрического метода необходимо брать пробы, реально встречающиеся при измерениях, а не приготовленные специально.

2. Для расчета параметров градуировочного уравнения целесообразно применять специальные методы, например метод Керриша.

3. На основе полученных нами данных натуральных измерений рассчитано градуировочное уравнение методом Керриша и методом наименьших квадратов. Коэффициент регрессии, полученный методом Керриша, на 15–26% меньше рассчитанных методом наименьших квадратов.

4. Существует различие между отдельными повторными измерениями интенсивности хлорофилла *in vivo*, т.е. в отдельных случаях результаты флуоресцентных измерений, выполненные с использованием 5-миллилитровой кюветы при флуориметрируемом объеме при-

близительно 1,5 мл, не в полной мере отражали реальное содержание хлорофилла в воде Онежского озера и рек, впадающих в Ладожское озеро. Наиболее вероятная причина этого заключается в недостаточной величине флуориметрируемого объема. Этот вопрос требует более тщательного изучения с привлечением данных видового и количественного состава фитопланктона изучаемой среды.

5. Большое внимание при использовании данного флуоресцентного метода должно быть уделено получению и измерению фильтрата. Неучет интенсивности флуоресценции фильтрата будет приводить к большим ошибкам в определении хлорофилла этим методом. Особое внимание необходимо обращать на чистоту оборудования и аккуратность выполнения операций при получении фильтрата. В противном случае возможны значительные ошибки, сказывающиеся на конечном результате.

6. На основе кинетических измерений интенсивности флуоресценции в присутствии диурона получено, что в первые 30 мин после добавления диурона интенсивность флуоресценции хлорофилла за 1 мин уменьшается приблизительно на 1% максимального значения, которое имеет место в начальный момент. Общее время измерения интенсивности флуоресценции хлорофилла *in vivo* в присутствии диурона, за которое она уменьшается не более, чем на 3-5%, составляет 3-5 мин.

#### Л и т е р а т у р а

- З а к с Л. Статистическое оценивание. М., 1976. 598 с.
- К а р а б а ш е в С.Г., З а н г а л и с К.П. К методике флуориметрического определения хлорофилла. - Океанология, 1971, т. 1, № 4, с. 735-738.
- Р у к о в о д с т в о по методам гидробиологического анализа поверхностных и донных отложений. Л., 1983, 239 с.
- С е б е р Дж. Линейный регрессионный анализ. М., 1980, 456 с.
- Ш а в ы к и н А.А. О методике экспрессного количественного определения хлорофилла „ $\alpha$ ” в морском фитопланктоне. - В кн.: Исследования биологии, морфологии и физиологии гидробионтов. Апатиты, 1983, с. 28-34.
- К е r r i c h J.E. Fitting the line  $y=ax$  when errors of observation are present in both variables. - Amer. Statist., 1966, vol. 20, p. 24-37.
- L o r e n z e n C.J., J e f f r e y S.W. Determination of chlorophyll in seawater. - UNESCO techn. pap. in mar. sci., 1980, N 35. 20 p.
- R a i H. Comparison between trichromatic spectrophotometric equations: sources of error. - Arch. Hydrobiol., 1980, N 4, p. 514-517.
- S l o v a s e k R.F., H a n n a n P.I. In vivo fluorescence determinations of phytoplankton chlorophyll „a”. - Limnol. Oceanogr., 1977, N 22, p. 919-925.

## МАРКИРУЮЩИЕ ПРИЗНАКИ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИКИ ОЗЕРНЫХ ВОД

Как известно (см., например, Петрова и др., наст. сб., с. 12–17; Россолимо, 1977; Шилькрот, 1968), „цветение“ воды, являясь результатом процесса эвтрофирования, сильно зависит (с точки зрения его пространственного распределения) от динамики водоема. Под влиянием динамики вод происходит перенос новообразованного органического вещества по акватории озера и главное – „перекачка“ его из верхнего (трофогенного) слоя вод в нижние (трофолитические) слои озера, в которых и происходят основные негативные изменения качества озерных вод (например, образование заморных и предзаморных зон).

Поэтому важной и наиболее сложной частью общей проблемы дистанционного слежения за процессом эвтрофирования является мониторинг динамики озерных вод, обуславливающей пространственное перераспределение фитопланктона в озере. В этой связи перед дистанционными методами, физическая сущность которых ограничивает их применение только регистрацией состояния поверхностного слоя вод, ставится трудная задача – контроль за спецификой внутриводных процессов в озерах.

Общая схема подхода к решению этой задачи основана на предположении, что на поверхности озерных вод находят свое отражение (в виде тех или иных признаков – индикаторов) различные проявления общезерного внутриводного динамического процесса. Это определяет возможность восстановления параметров внутриводной динамики по дистанционно фиксируемой совокупности проявлений („следов“) динамики вод на поверхности озера. К числу подобных проявлений относятся: 1) апвеллинг, 2) циркуляции Лэнгмюра, 3) термический бар, 4) внутренние волны, 5) горизонтальные внутриводные вихри, 6) притоки, 7) упорядоченная конвекция.

Все эти явления имеют внутриводный характер, но в том или ином виде отражаются на поверхности озерных вод. Кроме того, они представляют собой компоненты общей динамики озерных вод, обуславливающей перемешивание и перераспределение новообразованного органического вещества в озере. Обратимся теперь к краткой характеристике рассматриваемых явлений.

1. **А п в е л л и н г** – процесс вертикального движения вод, в результате которого глубинные воды достигают поверхности (Lafond, 1959).

Апвеллинг может возникать:

- в зонах дивергенции течений и в центрах циклонов вследствие оттока поверхностных вод от центров дивергенции (рис. 1, а);
- в прибрежных водах у подветренных берегов в результате сгона поверхностных вод от берега (рис. 1, б);
- в прибрежных зонах в районах выходов глубинных противотечений;

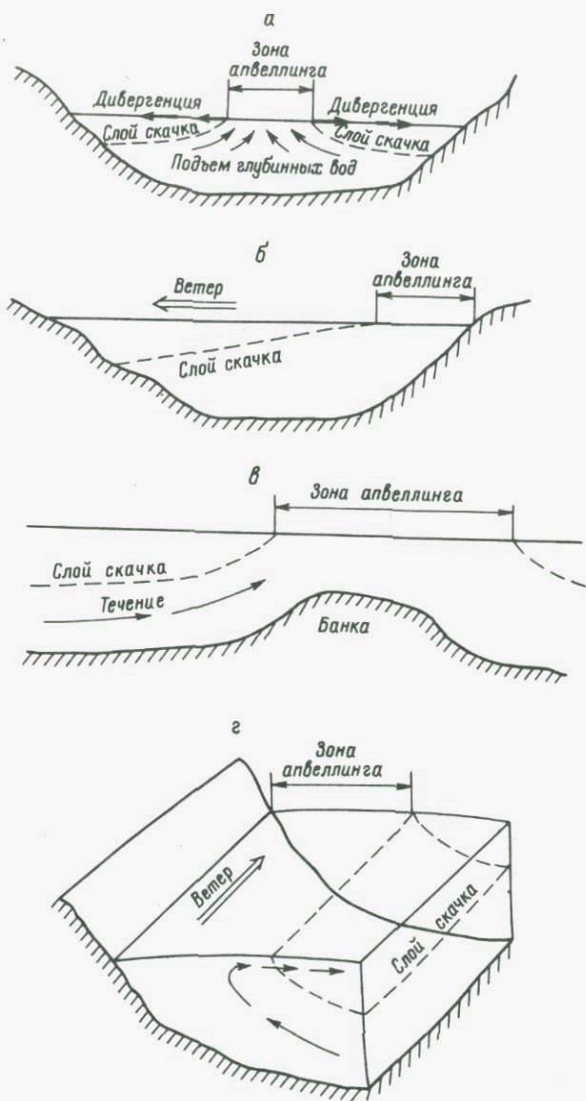


Рис. 1. Схемы возникновения апвеллинга на озерах.

а - в центре циклона, б - у подветренных берегов, в - над банками и отмелями, г - при устойчивых, параллельных берегу ветрах.

- у подветренных островов и мысов, выступающих навстречу глубинным течениям;
- над банками и отмелями, являющимися преградами на пути перемещения глубинных вод (рис. 1, в);
- в прибрежных зонах при устойчивых, дующих параллельно берегу ветрах, в результате которых поверхностные воды сгоняются к центру водоема, а им на смену поднимаются глубинные воды (рис. 1, г).

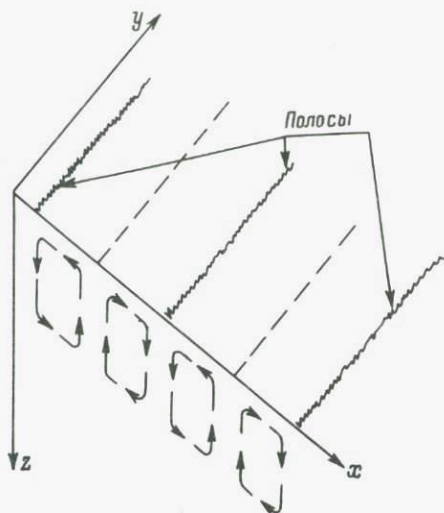
Независимо от причин, вызывающих апвеллинг, в зоне его действия возникает водная масса со свойствами, не соответствующими условиям формирования поверхностных вод. Обычно это холодные и менее насыщенные кислородом воды. Поэтому выход вод на поверхность сопровождается немедленными изменениями характеристик глубинных вод применительно к условиям существования их на поверхности: происходит интенсивный массо- и теплообмен с атмосферой; вследствие возникающего горизонтального градиента плотности образуются местные расходящиеся течения. Поскольку выход глубинных вод на поверхность является аномалией, нередко зоны апвеллинга сопровождаются особыми явлениями: туманы, заморы рыбы.

В стратифицированных озерах умеренных зон апвеллинг хорошо распознается на поверхности по возникновению относительно холодноводных зон. В зависимости от генерирующих факторов и морфометрии озера временные масштабы апвеллинга колеблются в широких пределах - от 10-20 мин до 2-3 сут (Бояринов, 1981; Дружинин и др., 1984). Размеры зон апвеллинга также могут варьировать: от площади порядка сотен квадратных метров до сотен квадратных километров.

2. Ц и р к у л я ц и я Л э н г м ю р а - особый вид поверхностных когерентных вихревых структур с горизонтальными осями, параллельными направлению ветра в приводном слое, возникающих при определенном комплексе гидрометеорологических условий (Ряжин и др., 1981).

На поверхности озера циркуляции Лэнгмюра маркируются параллельными направлению ветра полосами конвергенции, в которые стягиваются пена, водоросли, планктон, осколки льда, поверхностно-активные пленки и др. Полосы становятся заметными при скоростях ветра  $\bar{v}_a \geq 4$  м/с и образуются практически одновременно на всей акватории озера. Внезапное изменение направления ветра приводит к быстрой перестройке полос в соответствии с его новым направлением. Относительно узкие полосы конвергенции чередуются с широкими полосами дивергенции. На глубине проникновения циркуляций Лэнгмюра ( $Z_L$ ), зависящей от касательного напряжения ветра ( $\tau_z$ ) и начальной гидростатической устойчивости (частоты Вайсяля-Брэндта  $N_i$ ) верхних слоев и имеющей порядок  $0(Z_L) \sim 10^{-1} - 10^1$  м, наблюдается обратная картина. Соседние полосы конвергенции ограничивают циркуляционную ячейку с двумя разнонаправленными вихрями (рис. 2).

Рис. 2. Схема движения в циркуляционных ячейках согласно описанию Лэнгмюра.



Помимо вертикальной ( $w$ ) и поперечной ( $v$ ) составляющих вектора скорости в циркуляционных ячейках присутствует продольная ( $u$ ) составляющая, достигающая максимума в полосах и минимума между полосами конвергенции; различия возрастают со скоростью ветра (Рянжин, 1983). Кинематика циркуляций Лэнгмюра такова, что различия продольного и вертикального компонентов скорости максимальны, а поперечный минимален на глубине  $Z_n/2$ . В озере циркуляции Лэнгмюра имеют характерный временной масштаб:  $t_n \sim 2-6$  мин.

Расстояния между соседними полосами конвергенции ( $L$ ), или, что то же самое, поперечные размеры циркуляционных ячеек, изменяются в широких пределах:  $0(L) \sim 10^{-1} \div 10^1$  м. Иногда среди множества полос выделяются хорошо заметные с обильным количеством маркирующего материала — так называемые основные полосы, расстояния между которыми равно  $L_0$ . Между ними располагаются менее четко выраженные, вторичные, полосы с расстояниями  $L_B$  ( $L_0 > L_B$ ). В полях ячеек обоих масштабов обнаруживаются групповые структуры (Рянжин, 1982).

Касательное напряжение ветра — основной источник энергии циркуляций Лэнгмюра, на что указывает корреляционная связь их параметров с  $\bar{v}_\alpha$ . При этом пространственно-временные масштабы и энергия циркуляций растут с  $\bar{v}_\alpha$  (но ограничиваются глубиной участка) и уменьшаются с усилением гидростатической устойчивости верхних слоев озера.

З. Термический бар — явление, впервые отмеченное Форелем (Forel, 1901), возникает вследствие неравномерного прогревания мелководных и глубоководных частей озера весной и неравномерного охлаждения их осенью. Между мелководной и глубоководной частями озера весной и осенью возникает зона нисходящих движений, образующаяся вследствие конвергенции поверхностных вод (рис. 3).

Явление термического бара существует длительное время, охватывает значительную часть акватории озера, сопровождается комплексом вторичных динамических, биологических и химических процессов (Петрова, 1961; Noble, Anderson, 1968; Stoermer,

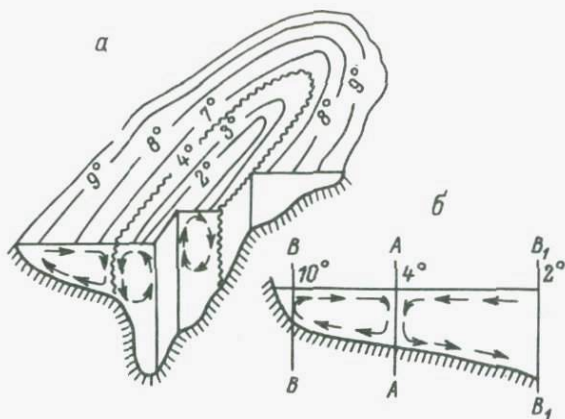


Рис. 3. Плотностная циркуляция в крупном глубоком озере во вторую фазу весеннего нагревания (Тихомиров, 1982).

а — озеро в целом; б — его прибрежный район.

1968) и имеет важное значение для формирования озерных экосистем (Тихомиров, 1982).

Весенний и осенний термические бары хорошо проявляются на поверхности озера как полоса конвергенции, возникающая на границе раздела теплых и холодных вод, а также как резкий контраст температуры между прибрежными и центральными водными массами.

4. Внутренние волны. При слабых и умеренных ветрах на поверхности озерных вод часто возникают полосы скопления органической пленки, достигающие нескольких десятков метров в ширину. Обычно их называют штилевыми или сликовыми полосами (Ролль, 1968). Длина полос может достигать нескольких километров, а расстояние между ними имеет порядок  $10-10^2$  м. Сливовые полосы могут смещаться со скоростями около  $10^1$  см/с. Обычно они перпендикулярны направлению ветра в приводном слое, а при переходе на мелководье часто следуют направлениям изобат. В ряде работ подробно исследовано распределение сликовых полос (Dietz, Lafond, 1950; Ewins, 1950).

В более поздних работах было показано, что появление сликовых полос связано с формированием внутренних волн, распространяющихся вдоль и поперек среднего течения. В верхнем квазиоднородном слое вод над гребнем развивающейся внутренней волны возникают восходящие, а над подошвой — нисходящие движения. Конвергирующие над подошвой волны потоки образуют сликовую полосу, маркирующую фронт внутренней волны (рис. 4). Часто слик оказывается смещенным относительно ложбины волны. Е. Лафонду (Lafond, 1959) удалось показать, что ширина слика в определенной мере характеризует глубину залегания и мощность сезонного термоклина.

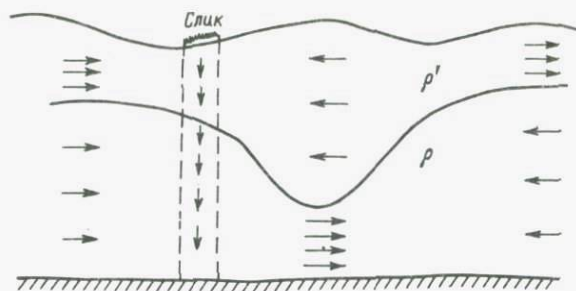


Рис. 4. Схема движения воды при образовании сликовых полос.

$\rho$  и  $\rho'$  — плотность воды.

Так же как и в полосах циркуляций Лэнгмюра, в сликовых полосах происходит гашение капиллярно-гравитационных волн. Важное отличие циркуляций Лэнгмюра от циркуляционных движений между сликами заключается в характере изменения продольной (вдоль полос конвергенции) составляющей вектора скорости вблизи поверхности. В штилевых полосах в результате своеобразного перераспределения момента внутренними волнами значения  $u$  минимальны, а между ними максимальны, тогда как в циркуляциях Лэнгмюра — наоборот (Рянжин, 1983). Другое важное различие состоит в несовпадении временных масштабов явлений, особенно заметном в условиях озерной изотермии.

Кроме того, сликовые полосы внутренних волн в отличие от лэнгмюровских образуют заметные углы с направлением ветра в приводном слое. Эти особенности позволяют сравнительно легко идентифицировать оба явления.<sup>1</sup>

5. Г о р и з о н т а л ь н ы е в н у т р и в о д н ы е в и х р и. Причиной появления относительно регулярных полос конвергенции может быть устойчивый горизонтальный градиент течения. Возникающие при этом вторичные течения могут иметь замкнутые линии токов, линии конвергенции в этом случае маркируют границу двух разнонаправленных вихрей с горизонтальными осями.

Появление устойчивых градиентов может быть вызвано: 1) изменением режима турбулентности в результате нарушения соотношения сил инерции и трения (Рыжков, 1966), 2) неравномерным воздействием силы Кориолиса в прибрежной мелководной и открытой глубоководной частях озера (Белюсова, 1973). В обоих случаях существенны орографические эффекты. В возникающих вихрях значения дивергенции и конвергенции почти на порядок величины больше фоновых (Рыжков, 1966).

<sup>1</sup> Следует отметить, что иногда циркуляции Лэнгмюра могут генерировать короткие внутренние волны (Рянжин, 1980).

Явление	Генерирующие силы, кинематика вод	Маркирующие признаки
1. Апвеллинг	Давление, дивергенция в центре циклона	Зона холодных вод
	Ветер, сгон поверхностного слоя вод	
	Течение, рельеф; подъем вод над банками, отмелями, у подветренных островов и мысов	
	Ветер, рельеф; подъем вод при ветрах, параллельных берегу	
2. Циркуляции Лэнгмюра	Ветер; система право- и левосторонних горизонтальных вихрей	Система параллельных полос пены, пленок, пыльцы, ориентированных по ветру
3. Термический бар	Прогрев прибрежных вод; конвергенция на фронтальном разделе	Полосы, ориентированные параллельно берегу; зона холодных центральных и теплых прибрежных вод
	Охлаждение прибрежных вод; конвергенция на фронтальном разделе	Полосы, ориентированные параллельно берегу; зона теплых центральных и холодных прибрежных вод
4. Внутренние волны	Импульс давления или ветра; система восходящих (над гребнем) и нисходящих (над подошвой) токов воды	Сликовые полосы, ориентированные перпендикулярно ветру; на мелководье следуют направлению изобат
5. Горизонтальные внутриводные вихри	Течение, рельеф; горизонтальный сдвиг скоростей течений	Слики и полосы, ориентированные по направлению переломов дна
6. Притоки	Сток рек; турбулентная диффузия	Контрасты цветности, прозрачности, температуры, электропроводности

	Зоны распространения		Масштабы	
	горизонтальная	вертикальная	временные	пространственные
Под центром циклона	Подветренное побережье	От поверхности до дна	Синоптические циклы	Десятки-сотни квадратных километров
			Синоптические циклы	Десятки квадратных метров-сотни квадратных километров
			Внутрисуточные циклы-сезоны	Десятки метров-десятки километров
			Зависят от продолжительности ветра	Десятки-сотни километров
Центральная часть озера		При стратификации - до слоя скачка, при гомотермии - до дна	Зависят от продолжительности ветра	Метры - десятки метров
Прибрежные воды		До дна в пределах свала глубин	Сезон весеннего нагревания	Сотни километров
			Сезон осеннего охлаждения	
Центральная часть озера		На глубине слоя скачка		Сотни метров-километры
Над резкими переломами рельефа дна		От поверхности до дна	Зависят от действия течения	До нескольких километров
Приустьевые зоны		В зависимости от плотности вод притока	Синоптические и сезонные циклы	Зависят от объема стока

Линейная теория объясняет появление одной пары вихрей неравномерным воздействием силы Кориолиса: усиление инерционных эффектов приводит к появлению системы вихрей, что делает эту систему похожей на лэнгмюровскую, но появление полос конвергенции за счет горизонтального сдвига течений (в отличие от лэнгмюровской) приурочено к определенным участкам акватории, поэтому обе системы полос вполне отличимы друг от друга.

**Б. П р и т о к и.** Характеристики вод озера и его притоков различны, поскольку первые формируются под влиянием физико-географических факторов озерной котловины, а вторые – под влиянием дренируемых водосборов. С момента поступления вод притоков в озерную котловину они начинают трансформироваться в озерные воды. Таким образом, в приустьевой части притока возникает некоторая зона, в пределах которой состав и свойства вод отличаются как от озерных, так и от речных. Исследование приустьевых зон представляет интерес с двух точек зрения:

- здесь формируются особые типы биотопов дна, промежуточные между речными и озерными, а поэтому приустьевые зоны иногда выступают в качестве основных нагульных угодий для рыб (в случаях поступления высококормных вод), а иногда превращаются в ощутимые источники вторичного загрязнения;
- изменение качества вод в зонах трансформации может свидетельствовать о состоянии примыкающего водосбора – об отсутствии или наличии источников загрязнения, поступлении биогенов и других явлениях, что открывает возможности для оперативного их обнаружения (Дружинин, 1984).

В зависимости от режима стока, рельефа и морфометрии озерной котловины воды притоков могут распространяться в озере по-разному: вдоль берега вправо и влево от устья, к центру озера, по поверхности, во взвешенном состоянии или у дна, что в совокупности приводит к резким и быстрым изменениям зон трансформации и весьма затрудняет их исследования контактными методами.

Как правило, зоны распространения притоков отмечаются на поверхности озера контрастами цветности воды, прозрачности, температуры и электропроводности.

**7. П о л о с ы с в о б о д н о й я ч е и с т о й к о н в е к ц и и.** Этот вид полос конвергенции выявляет ориентированную вдоль среднего сдвига течения свободную ячеистую конвекцию, имеющую широкий диапазон пространственно-временных масштабов. Конвекция в виде ячеек была экспериментально обнаружена Бенаром (Benard, 1900) и с тех пор неоднократно исследовалась теоретически и экспериментально (Ролль, 1968; Тэрнэр, 1977). Однако в условиях естественных водоемов упорядоченную конвекцию обнаружили сравнительно недавно (Архипова, Ржеплинский, 1949), и натурных наблюдений, описывающих это явление, пока явно недостаточно.

В табл. 1 приведены обобщенные сведения о маркирующих признаках, масштабах и зонах распространения рассмотренных динами-

ческих явлений, которые могут быть использованы для дешифрования динамики озерных вод.

### Л и т е р а т у р а

- А р х и п о в а Е.Г., Р ж е п л и н с к и й Г.В. Результаты экспериментальных наблюдений над конвекцией в естественных условиях. — Тр. ГОИН, 1949, вып. 11 (23), с. 39-49.
- Б е л о у с о в а Э.И. О формировании зон дивергенции и конвергенции вблизи берега. — Морск. гидрофиз. исслед., 1973, № 3(62), с. 54-59.
- Б о я р и н о в П.М. Вертикальные скорости в апвеллинге в заливе Большое Онего. — В кн.: Исследования экосистемы Онежского озера (оперативно-информационные материалы). 1981, с. 14-18.
- Д р у ж и н и н Г.В. Мониторинг внутриконтинентальных водоемов. — Водные ресурсы, 1984, № 5, с. 12-19.
- Д р у ж и н и н Г.В., К о р о т к е в и ч О.Е., Р у м я н ц е в В.Б. Распределение и динамика водных масс в Кондопожской губе Онежского озера. — Водные ресурсы, 1984, № 1, с. 131-139.
- П е т р о в а Н.А. Состав и динамика фитопланктона Якимварского залива Ладожского озера: Автореф. дис. Л., 1961. 19 с.
- П е т р о в а Н.А., Г у с а к о в Б.Л., Т е р ж е в и к А.Ю. Основные закономерности развития процесса антропогенного эвтрофирования в больших глубоких озерах. Наст. сб., с. 12-17.
- Р о л л ь У. Физика атмосферных процессов над морем. Л., 1968. 218 с.
- Р о с с о л и м о Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М., 1977. 98 с.
- Р ы ж к о в Ю.Г. Количественная характеристика системы вихрей с горизонтальными осями в безливном море. — Изв. АН СССР. ФАО, 1966, т. 2, № 10, с. 320-440.
- Р я н ж и н С.В. Об энергии и глубине проникновения циркуляций Лэнгмюра. — Изв. ВГО, 1980, т. 112, вып. 6, с. 147-154.
- Р я н ж и н С.В. О поперечных размерах циркуляционных ячеек Лэнгмюра при отсутствии термоклина. — Изв. АН СССР. ФАО, 1982, № 10, с. 194-204.
- Р я н ж и н С.В. О кинематике движения в циркуляционных ячейках Лэнгмюра. — Изв. АН СССР. ФАО, 1983, № 1, с. 82-92.
- Р я н ж и н С.В., Ф и л а т о в Н.Н., М и х а й л о в Ю.Д. Термодинамические процессы в глубоких озерах. Л., 1981. 220 с.
- Т и х о м и р о в А.И. Термика крупных озер. Л., 1982. 240 с.
- Т э р н е р Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М., 1977. 264 с.
- Ш и л ь к р о т Г.С. Гидрохимический режим озера в позднюю стадию антропогенного эвтрофирования (на примере оз. Белого). — Гидробиол. журн., 1968, т. 4, № 6, с. 41-51.

- B e n a r d N. Les turbillons cellulaires dans une nappe liquide. - Rev. Gen. Sci. Pures Appl, 1900, vol. 11, p. 1261-1271.
- D i e t z R., L a f o n d E. Natural slicks on the ocean. - J. Marine Res., 1950, vol. 9, N 3, p. 161-187.
- E w i n s G. Slicks, surface films and internal wavs. - J. Marine Res., 1950, vol. 9, N 3, p. 187-199.
- F o r e l F.A. Etudes thermique des lacs du nord de l'Europe. - Arch. Sci. phus. not. ser. 4, 1901, N 12, p. 35-55.
- L a f o n d E. Sea surface features and waves in the sea. - Indian J. Meteor. Geoph., 1959, vol. 10, N 4, p. 415-419.
- N o b l e V.E., A n d e r s o n R.F. Temperature and current in the Grand Haven, Michigan, vicinity during thermal bar conditions. - Proc. 11<sup>th</sup> Const. Great Lakes Res. Milwake, 1968, p. 470-479.
- S t o e r m e r E.F. Near shore phytoplankton populations in the grand Hewen, Michigan. - Lake Michigan vicinity during thermal bar conditions. Milwake, 1968, p. 134-142.

Р.Р. Кантер, Б.А. Каргин, Д.В. Поздняков

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ВОДОЕМОВ

Изучение водоемов по оптическим наблюдениям является задачей отражательной спектроскопии. Эта задача обладает двумя характерными особенностями. Первая обусловлена тем, что оптическими методами регистрируется не сама интересующая нас величина, а какой-либо косвенный параметр, связанный с исследуемой величиной некоторым функциональным соотношением. Вторая особенность связана с тем, что в формировании поля спектральной яркости выходящего из толщи воды света принимает участие большое количество оптически активных компонентов водоема и атмосферы. В связи с этими особенностями основными целями численного моделирования поля оптического излучения, отраженного водоемом, являются: установление функциональной зависимости между наблюдаемыми характеристиками поля излучения и интересующими нас параметрами водоема; выделение роли отдельных факторов в формировании поля отраженного оптического излучения. Такая информация крайне важна при изучении информативности оптических наблюдений водоемов и при разработке и оптимизации методов оптического дистанционного зондирования.

В настоящее время для численного моделирования оптических наблюдений водоемов широко применяется метод Монте-Карло

(см., например, Gordon, Brown, 1974; Gordon et al., 1975; Plass, Kattawar, 1969; Plass et al., 1978; Джетыбаев, Каргин, 1982, 1983; Голубицкий, Левин, 1974). Этот метод позволяет наиболее полно учесть физические и оптические свойства водоема и атмосферы. Другое важное свойство метода, обеспечивающее ему преимущество перед другими численными методами, заключается в возможности вычисления статистических характеристик наблюдаемых оптических полей и оценки корреляций между результатами наблюдений и интересующими нас параметрами водоема. В настоящей работе кратко рассмотрены результаты расчетов некоторых характеристик поля отраженного водоемом оптического излучения. Расчеты выполнены в связи с изучением информативности оптических наблюдений водоемов с целью дистанционной индикации хлорофилла фитопланктона.

Начнем с постановки задачи. Рассмотрим слой  $0 \leq z \leq H$  трехмерного пространства, заполненный рассеивающим и поглощающим свет веществом. Граница слоя  $z=H$  освещается в направлении  $\omega_0 = (\mu_0, \varphi_0)$  параллельным потоком фотонов единичной мощности;  $\mu_0$  - косинус угла  $\vartheta_0$  между направлением  $\omega$  и осью  $Oz$ ;  $\varphi_0$  - азимут плоскости солнечного вертикала. При попадании на плоскость  $z=0$  свет испытывает отражение по закону Ламберта с альбедо  $A$ . В плоскости  $z=h$  расположена граница раздела двух сред, при взаимодействии с которой свет испытывает преломление и отражение. Эта граница представляет собой случайную поверхность, составленную из набора элементарных площадок, центры которых лежат в плоскости  $z=h$ , а нормали к площадкам  $e$  - случайные единичные векторы с плотностью распределения вероятности  $p(e)$ . Рассеивающие и поглощающие свойства среды будем характеризовать показателями рассеяния  $\sigma(z)$ , поглощения  $\alpha(z)$  и индикатрисой рассеяния  $g(z, \mu)$ , где  $\mu$  - косинус угла рассеяния.

Расчет различных характеристик поля излучения методом Монте-Карло заключается в моделировании на ЭВМ траекторий случайной марковской цепи столкновений квантов света в системе водоем-атмосфера и вычислении статистических оценок для искомых функционалов от решения уравнения переноса, описывающего световой режим в системе (Джетыбаев, Каргин, 1982). Детальное изложение способов построения траекторий приведено, например, в работе Марчука и др. (1976). Реализация метода с использованием зависимых испытаний и вычисление случайных оценок для расчетов поля яркости рассматриваемой системы, которые применялись в настоящих расчетах, достаточно подробно описаны Джетыбаевым и Каргиным (1982). Для расчетов пространственно-угловой структуры поля яркости использовались локальные оценки, которые, как показано Каргиным и Кузнецовым (1984), удовлетворяют определенным условиям гладкости, обеспечивающим их функциональную сходимость.

Обратимся теперь к собственно задаче дистанционного зондирования хлорофилла в воде. В настоящее время разработано несколько подходов к ее решению. Все они так или иначе связаны с прибли-

женной параметризацией функциональной зависимости между какими-либо характеристиками поля оптического излучения и концентрацией хлорофилла и других субстанций, содержащихся в воде. Здесь на основе моделирования процесса переноса солнечного излучения в системе водоем-атмосфера даются некоторые оценки точности одного из подходов, который применен Букатой и др. (Bukata et al., 1981) для индикации хлорофилла в оз. Онтарио.

Обозначим через  $I_{\lambda}(z, \omega)$  интенсивность (яркость) монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$  на уровне  $z$  в направлении  $\omega$ , через  $E_{\lambda}^{\uparrow}(z)$  и  $E_{\lambda}^{\downarrow}(z)$  - полусферические потоки соответственно восходящего и нисходящего излучения.

Рассмотрим величину  $R_{\lambda}(z) = E_{\lambda}^{\uparrow}(z) / E_{\lambda}^{\downarrow}(z)$ , которая в гидрооптической литературе называется коэффициентом диффузного отражения. Для коэффициента  $R_{\lambda}(z)$  предложено (Gordon, Brown, Jacobs, 1975) следующее параметрическое представление:

$$R_{\lambda}(z) = \sum_{n=0}^N r_n(z) \cdot \chi_{\lambda}^n, \quad (1)$$

где

$$\chi_{\lambda} = \frac{\beta_{\lambda}(z)}{\alpha_{\lambda}(z) + \beta_{\lambda}(z)}; \quad (2)$$

$\beta_{\lambda}(z)$  - показатель рассеяния назад;  $r_n(z)$  - некоторые коэффициенты.

На основе этого представления построены прогностические диаграммы (Bukata et al., 1981), которые позволяют по значениям  $R_{\lambda_1}(h_-)$  и  $R_{\lambda_2}(h_-)$  для двух разных длин волн света  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  приблизительно находить содержание хлорофилла в воде (аргумент  $h_-$  означает, что значения  $R_{\lambda}$  взяты непосредственно под поверхностью водоема). Для дистанционного определения значения  $R_{\lambda}(h_-)$  используется следующее приближенное соотношение:

$$I_{\lambda}(h_+, \omega) = \frac{0.98 \cdot R_{\lambda}(h_-)}{\pi \cdot n^2 [1 - 0.48 R_{\lambda}(h_-)]} \times \quad (3)$$

$$\times [0.98 E_{\lambda,0}^{\downarrow}(h_+) + 0.934 \cdot E_{\lambda,p}^{\downarrow}(h_+)] + 0.02 \cdot I_{\lambda}(h_+, \omega') + f \cdot E_{\lambda,0}^{\downarrow}(h_+),$$

где  $I_{\lambda}(h_+, \omega)$  - яркость излучения в направлении  $\omega$  сразу над поверхностью водоема;  $E_{\lambda,0}^{\downarrow}(h_+)$  и  $E_{\lambda,p}^{\downarrow}(h_+)$  - потоки нерассеянного и рассеянного излучения, приходящего на поверхность водоема из атмосферы;  $f$  - некоторый фактор, учитывающий "среднее" волнение;  $n$  - коэффициент преломления воды;  $\omega' = \omega - 2(\omega, K)K$ ;  $K = (0, 0, 1)$  - единичный вектор, направленный вдоль оси  $Oz$ .

Таким образом, по измерениям величин  $I_{\lambda}(h_+, \omega)$ ,  $E_{\lambda,0}^{\downarrow}(h_+)$ ,  $E_{\lambda,p}^{\downarrow}(h_+)$ ,  $I_{\lambda}(h_+, \omega')$  и  $f$  в двух участках спектра можно при-

ближенно оценить величины  $R_{\lambda_1}(h_2)$  и  $R_{\lambda_2}(h_2)$  и далее, используя упомянутые диаграммы, определить содержание хлорофилла в воде.

Представленные далее результаты расчетов получены для длин волн  $\lambda = 0,55$  и  $0,67$  мкм. Высотный ход коэффициентов молекулярного рассеяния и поглощения в атмосфере был взят из модели (Eli-terman, 1968). В качестве оптической модели аэрозольной атмосферы была принята оптическая модель континентального аэрозоля (A preliminary cloudless standart atmosphere..., 1982) с метеорологической дальностью видимости  $S_M = 25$  км. Соответствующие индикатрисы рассеяния аэрозолем вычислялись по формулам теории Ми.

При взаимодействии света с взволнованной поверхностью водоема вероятности отражения и преломления вычислялись по формулам Френеля для коэффициента преломления воды  $n = 1,33$ . Плотность распределения нормали к взволнованной поверхности определялась (Cox, Munk, 1954) двумерной гауссовой плотностью распределения уклонов элементарных площадок с параметрами, зависящими от скорости ветра над поверхностью водоема:

$$P(z_x, z_y) = \frac{1}{2\pi\alpha_x\alpha_y} \exp \left[ -\left( \frac{z_x}{\alpha_x} \right)^2 - \left( \frac{z_y}{\alpha_y} \right)^2 \right],$$

$$e_x = -z_x / \sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}, \quad e_y = -z_y / \sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1},$$

$$e_z = 1 / \sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}, \quad \alpha_x^2 = -3.16 \cdot 10^{-3},$$

$$\alpha_y^2 = 0,003 + 1,92 \cdot 10^{-3}v, \text{ где } v - \text{ скорость ветра, м/с.}$$

Коэффициенты рассеяния и поглощения света водой представлялись в виде (Bukata et al., 1981)

$$\alpha_{\lambda}(z) = \alpha_{\omega}(\lambda) + C_{\text{Хл}}(z) \cdot \alpha_{\text{Хл}}(\lambda) + C_{\text{МВ}}(z) \alpha_{\text{МВ}}(\lambda) +$$

$$+ C_{\text{НОВ}}(z) \cdot \alpha_{\text{НОВ}}(\lambda) + C_{\text{РОВ}}(z) \cdot \alpha_{\text{РОВ}}(\lambda),$$

$$\sigma_{\lambda}(z) = \sigma_{\omega}(\lambda) + C_{\text{Хл}}(z) \cdot \sigma_{\text{Хл}}(\lambda) + C_{\text{МВ}}(z) \cdot \sigma_{\text{МВ}}(\lambda) + C_{\text{НОВ}}(z) \cdot \sigma_{\text{НОВ}}(\lambda).$$

Здесь индексами  $\omega$ , Хл, МВ, НОВ и РОВ обозначены соответственно чистая вода, хлорофилл, минеральная взвесь, неживое органическое вещество и растворенное органическое вещество, а буквой  $C$  - концентрация вещества, соответствующего индексу. В табл. 1 представлены принятые в расчетах значения коэффициентов рассеяния и поглощения. Концентрация хлорофилла в поверхностном слое варьировалась от 0,1 до 40 мг/м<sup>3</sup>, что соответствует вариациям значений концентрации  $C_{\text{Хл}}$  в центральной части Ладожского озера,

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты рассеяния и поглощения света в воде  
(Bukata et al., 1981)

$\lambda$ , мкм	$\alpha_w + C_{\text{РОВ}} \cdot \alpha_{\text{РОВ}}$ , м <sup>-1</sup>	$\alpha_{\text{Хл}}$ , м <sup>2</sup> /мг	$\alpha_{\text{МВ}}$ , м <sup>2</sup> /г	$\alpha_{\text{НОВ}}$ , м <sup>2</sup> /г
0.550	0.122	0.0173	0.0185	0.00098
0.670	0.379	0.0100	0.0125	0.0

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

$\lambda$ , мкм	$\beta_w$ , м <sup>-1</sup>	$\beta_{\text{Хл}}$ , м <sup>2</sup> /мг	$\beta_{\text{МВ}}$ , м <sup>2</sup> /г	$\beta_{\text{НОВ}}$ , м <sup>2</sup> /г
0.550	0.151	0.128	0.643	0.351
0.670	0.404	0.104	0.512	0.290

В качестве вертикального распределения концентрации хлорофилла был принят профиль, проходящий на глубинах 0, 1, 3, 5, 7.5, 10, 25 и 60 м, где соответствующие им  $C_{\text{Хл}}$  равны 1, 1.09, 1.20, 1.92, 0.37, 0.24, 0.22 и 0.24 мг/м<sup>3</sup>.

Концентрации минерального и неживого органического гидрозолой были взяты равными  $C_{\text{МВ}} = C_{\text{НОВ}} = 6$  г/м<sup>3</sup>.

Для обеих длин волн в расчетах была принята индикатриса рассеяния, измеренная 7 10 71 в Петрозаводском заливе Онежского озера (табл. 2). Значения индикатрисы рассеяния при  $\psi = 0^\circ$  и  $150^\circ < \psi \leq 180^\circ$  были найдены с помощью линейной экстраполяции.

Рассмотрим далее результаты расчетов. На рис. 1 представлены зависимости коэффициента диффузного отражения  $R_\lambda(h_-)$  от концентрации хлорофилла. В расчетах значений  $\alpha_\lambda$  по формуле (2) в соответствии с работой Букаты с сотрудниками (Bukata et al., 1981) полагалось, что

$$\beta_\lambda(z) = \beta_w(\lambda) + C_{\text{Хл}}(z) \cdot \beta_{\text{Хл}}(\lambda) + C_{\text{МВ}}(z) \cdot \beta_{\text{МВ}}(\lambda) + C_{\text{НОВ}}(z) \cdot \beta_{\text{НОВ}}(\lambda).$$

Величины  $\beta_w$ ,  $\beta_{\text{Хл}}$ ,  $\beta_{\text{МВ}}$  и  $\beta_{\text{НОВ}}$ , заимствованные из той же работы, приведены в табл. 3. Коэффициент  $R_\lambda(h_-)$  вычислялся по формуле (1) с параметрами, представленными Гордоном и др. (Gordon, Brown, Jacobs, 1975).

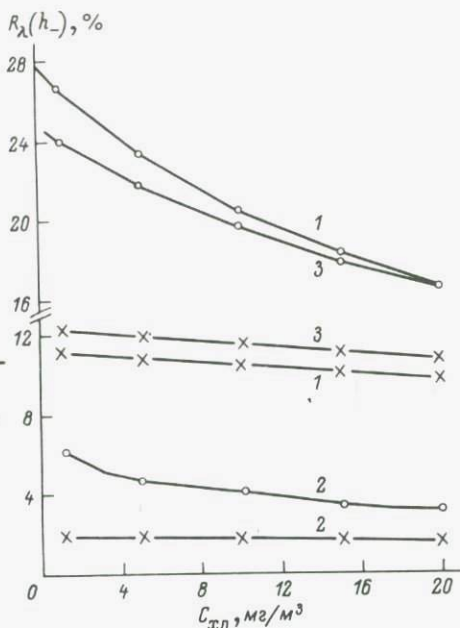
Цифрой 3 на рис. 1 обозначены значения  $R_\lambda(h_-)$ , вычисленные по формуле

$$R_\lambda(h_-) = \alpha \cdot \beta(\lambda) / [\alpha_\lambda + \beta_\lambda], \quad (4)$$

полученной в квазиоднократном приближении (Голубицкий, Левин, 1974). Множитель  $\alpha$  в (4) был принят равным 0.41. Значительное отличие  $R_\lambda(h_-)$ , полученных методом Монте-Карло, от кривых,

Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузного отражения  $R_{\lambda}(h_-)$  от концентрации хлорофилла  $C_{Хл}$ .

Точки -  $\lambda = 0.55$  мкм, крестики -  $\lambda = 0.67$  мкм;  $\theta_0 = 60^\circ$ ;  $v = 6$  м/с;  $C_{МВ} = C_{НОВ} = 6$  г/м<sup>3</sup>. Расчет: 1 - по формулам (1) и (2), 2 - по методу Монте-Карло, 3 - по формуле (4).



построенных по формулам (1), (2) и (4), объясняется несоответствием принятой в расчетах индикатрисы рассеяния величинам показателя рассеяния назад  $\beta(\lambda)$ . Это отличие свидетельствует о том, что использование конкретных диаграмм, например,

изоплет (Yukata et al., 1981), предназначенных для определения концентраций хлорофилла и минеральных взвесей по измерениям значений  $R_{\lambda}(h_-)$  в двух участках спектра, требует предварительного масштабирования этих значений. Например, по значениям  $R_{0.55}(h_-)$  и  $R_{0.67}(h_-)$ , полученным методом Монте-Карло и взятым с множителем 5.5 (используя изоплеты из этой работы), величины концентраций хлорофилла и минеральных взвесей во всем диапазоне их изменения определяются с погрешностью не более 20%. Один из возможных способов такого масштабирования заключается в построении таких диаграмм, в которых для определения искомым концентраций вместо значений  $R_{\lambda_1}(h_-)$  и  $R_{\lambda_2}(h_-)$  ис-

Т а б л и ц а 2

Индикатриса рассеяния  $g(\vartheta)$ , измеренная 7 10 71 в Петрозаводском заливе Онежского озера

$\vartheta$ , град.	$g$	$\vartheta$ , град.	$g$	$\vartheta$ , град.	$g$	$\vartheta$ , град.	$g$	$\vartheta$ , град.	$g$
0	15849	17.5	2.2	90	0.013	150	0.011	172.5	0.014
1	1000	20	1.4	100	0.010	155	0.012	175	0.014
2.5	199.5	30	0.35	110	0.0096	157.5	0.012	177.5	0.015
5	39.8	40	0.140	120	0.0093	160	0.013	180	0.016
7.5	17.8	50	0.070	130	0.0098	162.5	0.013		
10	10	60	0.040	135	0.010	165	0.013		
12.5	6.3	70	0.025	140	0.010	167.5	0.014		
15	3.2	80	0.018	145	0.011	170	0.014		

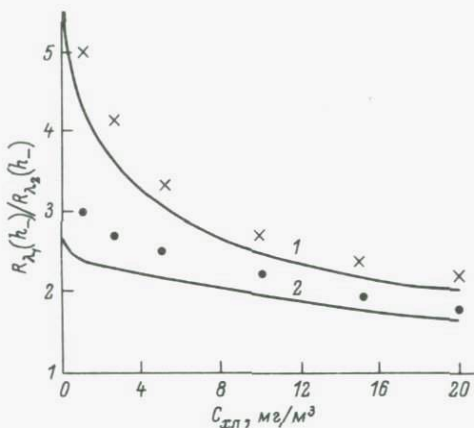


Рис. 2. Зависимость отношения  $R_{\lambda_1}(h_-)/R_{\lambda_2}(h_-)$  от концентрации хлорофилла  $C_{ХЛ}$ .

$\theta_0 = 60^\circ$ ,  $v = 6$  м/с. 1 -  $C_{МВ} = 10\% C_{ХЛ}$ ,  $C_{НОВ} = 0$ ; 2 -  $C_{МВ} = C_{НОВ} = 6$  г/м<sup>3</sup>. Кривая 1 - из работы Букаты с сопр. (Bucata et al., 1981), кривая 2 - расчет по формулам (1) и (2); крестики и точки - расчет методом Монте-Карло для  $\lambda = 0,55$  мкм и  $\lambda = 0,67$  мкм соответственно.

пользуются отношения  $R_{\lambda_1}(h_-)/R_{\lambda_3}(h_-)$  и  $R_{\lambda_2}(h_-)/R_{\lambda_3}(h_-)$ . Для этого необходимо измерение величины  $R_{\lambda_3}(h_-)$  дополнительно в каком-либо участке спектра с длиной волны  $\lambda_3$ . Отношения коэффициентов диффузного отражения в разных участках спектра мало чувствительны к форме индикатрисы рассеяния. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 2. Верхняя кривая на этом рисунке заимствована из работы Букаты с сотрудниками (Bucata et al., 1981, рис. 1) и приведена для сравнения.

Сделаем далее несколько замечаний относительно точности определения значений  $R_{\lambda}(h_-)$  по измерениям  $I_{\lambda}(h_+, \omega)$  с применением приближенного соотношения (3). Многочисленные расчеты для разных углов освещения Солнцем атмосферы и различных углов визирования водоема показали, что погрешность определения коэф-

Т а б л и ц а 3

Показатели рассеяния назад

$\lambda$ , мкм	$\beta_w$ , м <sup>-1</sup>	$\beta_{ХЛ}$ , м <sup>2</sup> /мг	$\beta_{МВ}$ , м <sup>2</sup> /г	$\beta_{НОВ}$ , м <sup>2</sup> /г
0,550	-0,0128	0,00241	0,0525	0,00972
0,670	-0,00936	0,00175	0,0333	0,00472

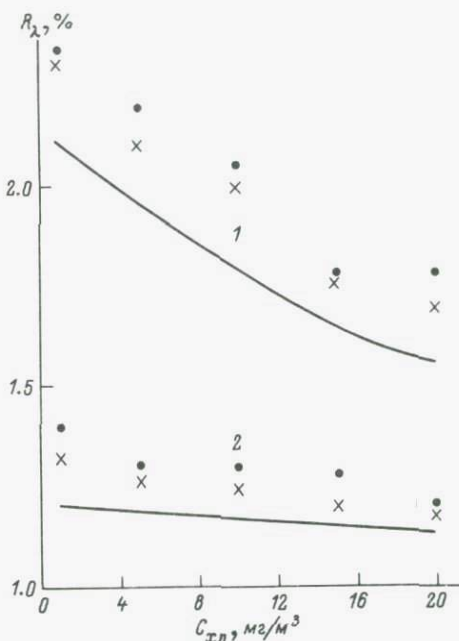


Рис. 3. Влияние концентрации хлорофилла на коэффициент яркости водоема.

$\theta_0 = 60^\circ$ ;  $C_{\text{МВ}} = C_{\text{НОВ}} = 6 \text{ г/м}^3$ . 1 -  $\lambda = 55 \text{ мкм}$ , 2 -  $\lambda = 0.67 \text{ мкм}$ . Сплошные линии - расчет по формуле (5); точки ( $v = 6 \text{ м/с}$ ) и крестики ( $v = 2 \text{ м/с}$ ) - расчет методом Монте-Карло.

коэффициента диффузного отражения из соотношения (3) практически для всего рассмотренного диапазона изменений концентрации хлорофилла не превышает 20%. Например, для атмосферы с оптической толщиной  $\tau = 0.265$ , освещенной под углом  $60^\circ$ , при  $v = 6 \text{ м/с}$  и  $C_{\text{хл}} = 2.25 \text{ мг/м}^3$  имеем:  $E_0^\dagger = 0.584$ ,  $E_r^\dagger = 0.228$ ,  $I(h_+, \omega) = 0.022$ ,  $I_{0.55}(h_+, K) = 0.0083$ ,  $I_{0.67}(h_+, K) = 0.0032$ . Вычисления по формуле (3) в этом случае дают  $R_{0.55}(h_-) = 0.06$ ,  $R_{0.67}(h_-) = 0.023$ . Соответствующие точные значения, вычисленные непосредственно методом Монте-Карло, равны  $R_{0.55}(h_-) = 0.052$  и  $R_{0.67}(h_-) = 0.019$ . Общая погрешность оценки концентраций хлорофилла и минеральной взвеси по значениям  $I_{0.55}(h_+, \omega)$  и  $I_{0.67}(h_+, \omega)$  с помощью диаграммы 5 из работы Букаты с сотрудниками (Bukata et al., 1981) с учетом упоминавшегося масштабного множителя 5.5 в подавляющем числе случаев не превысила 60%. Отметим, что практически такая же точность достигается при вычислении коэффициента диффузного отражения по формуле

$$R_{\lambda}(h_-) = \frac{\rho_{\lambda} - 0.007}{0.11} \cdot \alpha,$$

которая получается из полуэмпирического соотношения (Пелевин, 1978)

$$\rho_{\lambda} = 0.11\beta_{\lambda} / (1 + 0.007/\rho_{\lambda}) [\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda}] \quad (5)$$

в комбинации с соотношением (4). Здесь  $\rho_{\lambda}$  — коэффициент яркости водоема в направлении в надир.

На рис. 3 приведены результаты расчетов коэффициента  $\rho_{\lambda}$  в зависимости от концентрации хлорофилла. Кривые получены из соотношения (5), а точками и крестиками обозначены результаты расчетов методом Монте-Карло.

В заключение отметим, что приведенные результаты не претендуют на подробный анализ точности рассмотренной методики индикации хлорофилла по оптическим наблюдениям. Этот материал можно рассматривать как исходную предпосылку для замкнутого численного эксперимента по исследованию информативности оптических наблюдений водоемов.

### Л и т е р а т у р а

- Г о л у б и ц к и й Б.М., Л е в и н И.М. Пропускание и отражение слоя среды с сильно анизотропным рассеянием. — Изв. АН СССР. ФАО, 1974, т. 16, № 10, с. 1051-1058.
- Д ж е т ы б а е в Е.О., К а р г и н Б.А. Применение статистического моделирования в задаче оптического зондирования системы атмосфера-океан. — В кн.: Актуальные проблемы прикладной математики и математического моделирования. Новосибирск, 1982, с. 83-91.
- Д ж е т ы б а е в Е.О., К а р г и н Б.А. О наблюдении внутренних волн в океане. — Исследование Земли из космоса, 1983, № 1, с. 84-87.
- К а р г и н Б.А., К у з н е ц о в С.В. О применении локальных оценок при моделировании поля яркости атмосферы. — Препринт ВЦ СО АН СССР, № 559. Новосибирск, 1984. 18 с.
- М а р ч у к Г.И., М и х а й л о в Г.А., Н а з а р а л и е в М.А. и др. Методы Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск, 1976. 280 с.
- П е л е в и н В.Н. Оценка концентраций взвеси и хлорофилла в море по измеряемому с вертолета спектру восходящего излучения. — Океанология, 1978, т. 18, вып. 3, с. 428-433.
- В u k a t a R.P., B r u t o n J.E., J e r o m e J.H. et al. Optical water quality model of Lake Ontario. 2. Determination of chlorophyll and suspended mineral concentration of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. — J. Appl. Opt., 1981, vol. 20, N 9, p. 1704-1714.
- С о х С., M u n k W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the

- sun's glitter. - J. Opt. Soc. Amer., 1954, vol. 44, N 11, p. 838-850.
- Eltermann L. UV visible and IR attenuation for altitudes to 50 km. 1968. 50 p.
- Gordon H.R., Brown O.B. Influence of bottom depth and albedo on the diffuse reflectance of a flat homogeneous ocean. - J. Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 9, p. 2153-2159.
- Gordon H.R., Brown O.B., Jacobs M.M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. - J. Appl. Opt., 1975, vol. 14, N 2, p. 417-427.
- A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computations. - Boulder, Colorado, USA, 1982. 32 p.
- Plass G.N., Kattawar G.W. Radiative transfer in an atmosphere-ocean system. - J. Appl. Opt., 1969, vol. 8, N 2, p. 455-466.
- Plass G.N., Humphreys T.Y., Kattawar G.W. Color of the ocean. - J. Appl. Opt., 1978, vol. 17, N 9, p. 1432-1446.
- Violler M., Deschamps P.Y., Lecomte P. Airborne remote sensing of chlorophyll content under cloudy sky as applied to the tropical waters in Gulf of Guinea. - Remote Sens. Environ., 1978, vol. 7, N 3, p. 235-248.

В.Б. Румянцев

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЕНКИ ВОДЫ В ОЗЕРАХ

Оптическая информация, получаемая дистанционными методами, формируется водной поверхностью или некоторым поверхностным слоем водной среды. В связи с этим приобретает большое значение решение вопроса об оптических, гидробиологических и гидрохимических особенностях этого слоя. Для понимания и оценки некоторых явлений природы водоемов имеют значение закономерности, связанные с состоянием тончайшего поверхностного слоя воды толщиной  $10^{-7}$  см - пленки поверхностного натяжения воды (ППНВ). Однако при оценке эффекта ППНВ невозможно ограничиться только этой пленкой в силу неразрывности связей между нею и другими физико-химическими и биологическими явлениями в приповерхностном слое, составляющем 1-2 см в озерах и 5-10 см в морях. Эта поверхностная толща представляет собой активный переходный слой от воды к воздуху, который в первую очередь подвергается воздействию потоков вещества и энергии.

Начало исследований в тонких приповерхностных слоях водоемов было заложено гидробиологами (Naumann, 1915; Rylov, 1926). Они отметили, что среди богатого многообразия водных организмов выделяются виды, развивающиеся вблизи ППНВ и составляющие нейстонное сообщество. Б.А. Скопинцев (1939) обнаружил, что концентрация органического вещества и количество бактерий, пылеватых частиц, остатков трупных планктонных форм в верхней пленке океана и озер на 1–2 порядка выше, чем в нижележащих слоях воды. Повышенная концентрация популяций планктонных организмов в тонком приповерхностном слое – явление, распространенное в морском (Зайцев, 1974; Цыбань, 1970) и озерно–речном планктоне (Заварзин, 1955; Драчев и др., 1963). Л.Е. Корш (Драчев и др., 1957) на Клязминском водохранилище определил, что слой толщиной около 1 мм содержит в 2–10 раз больше сапрофитных бактерий, а по данным Заварзина (1955) количество микроорганизмов в поверхностном микрослое дельты Волги было примерно в 100 раз выше, чем в нижележащих слоях (таблица).

Образование биологической пленки на поверхности воды приводит к увеличению концентрации кислорода непосредственно под ней (рис. 1). Концентрация органических веществ, связанная с поверхностными явлениями, выражается и в пенообразовании. Химический состав пены (Драчев и др., 1963) характеризует состав поверхностной пленки воды. В пене (по сравнению с водой) отмечаются повышенная цветность, окисляемость, БПК<sub>5</sub> и разнообразие азотистых соединений; содержание эфирнорастворимых веществ выражалось величинами 350–1440 мг/л. По бактериологическим показателям пена приближается к очень сильно загрязненным участкам водоема. Аналогичные исследования были успешно проведены на морях (Зайцев, 1974; Цыбань, 1970).

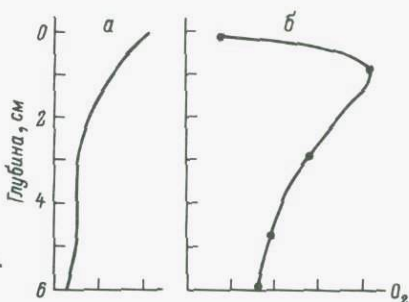
В Ладожском и Онежском озерах скопления популяций планктонных организмов (нейстон) по составу, условиям формирования, динамизму миграций и устойчивости скоплений во времени существенно отличаются от нейстона морей и малых водоемов (Николаев, 1971). Нейстонные скопления в Ладожском и Онежском озерах представлены теми же видами, что и внутриводный планктон, но

Концентрация микроорганизмов (тыс. кл./мл) в водоемах в зависимости от глубины (см) по Г.А. Заварзину (1955)

Глубина, см	Счет на фильтрах			Счет с высевом на чашках с МПА		
	300 000	450 000	350 000	40,0	120,0	260,0
Пленка	300 000	450 000	350 000	40,0	120,0	260,0
Под пленкой	3400	2090	2770	-	-	-
1	3400	2190	3120	0,84	140,0	2,1
2	3800	-	2380	0,26	-	1,6
5	2600	1770	2920	1,84	37,0	-
7	3500	1860	4900	2,08	-	2,5

Рис. 1. Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) при отсутствии (а) и наличии (б) биологической пленки (по Заварзину, 1955).

а - рН=6.7,  $T=26^\circ C$ ; б - рН=7.6,  $T=26^\circ C$ .



количественно они значительно его превосходят. В этих озерах глубина микросоны нейстона неустойчива: она хорошо выражена при тихой погоде в момент развития летне-осеннего планктона. Лучшая обеспеченность пищей и благоприятные условия воспроизводства у поверхности воды - главные факторы концентрации здесь многих популяций организмов. По данным В.А. Цыбань (1970), основа трофических ресурсов микрофауны и флоры у поверхности морской пленки - повышенная концентрация на ее границе гидрофобных органических веществ, всплывающих из водной толщи, а также ускоренная прогреваемость тонкой пленки воды, интенсивная освещенность, богатство спектра излучения, поступление из атмосферы органической и минеральной пыли, своеобразный газовый режим. Избыток биогенных веществ и максимальная для водоемов спектральная освещенность поверхностной микросоны - причина повышенной концентрации сине-зеленых водорослей, скопления которых хорошо видны на поверхности воды в периоды "цветения", особенно при тихой погоде.

Совокупность множества вкраплений в ППНВ с обеих сторон делает водную поверхность "шероховатой" для падающего прямого излучения.

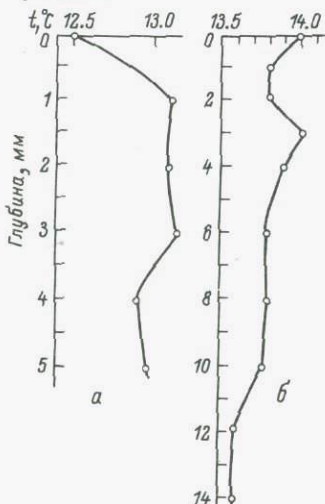


Рис. 2. Температура в тонком поверхностном слое озерной воды, измеренная микротермозондом.

а - при температуре воздуха  $20^\circ C$  и скорости ветра 2-3 м/с в 10 ч 00 мин; б - при температуре воздуха  $20,2^\circ C$  и скорости ветра до 1 м/с в 12 ч 30 мин.

Таким образом, по совокупности отмеченных причин водная поверхность в реальных условиях далеко не идеальная гладкая поверхность для прямого падающего излучения, особенно коротких длин волн.

Экспериментальные данные, полученные автором в озерных условиях с помощью микротермозонда, говорят о том, что при ветре 2–3 м/с поверхностная пленка в озере интенсивно выхолаживается и относительная однородность воды наблюдается с глубины 1 мм (рис. 2).

Отмеченными особенностями поверхностного микрослоя воды в процессе его взаимодействия с потоком поступающей энергии и мозаичностью распределения разнотипных биологических и органомонофосфатных пленок по акватории Ладожского озера можно объяснить появление аномальных по температуре полос и пятен, фиксируемых со спутников в периоды штилевой погоды и гидрологической весны,

#### Л и т е р а т у р а

- Д р а ч е в С.М., Б ы л и н к и н а А.А., С о с у н о в а И.Н. О значении адсорбционно-поверхностных явлений при самоочищении водоемов. – Тр. Всесоюз. гидробиол. об-ва, 1963, т. 14, с. 66–73.
- Д р а ч е в С.М., К о р ш Л.Е., М и т я г и н а О.В. О микрофлоре поверхности водоемов. – Журн. гигиены, эпидемиологии, микробиологии и иммунологии, 1957, № 1, с. 372–380.
- З а в а р з и н Г.А. Бактериальное население поверхностной пленки воды в естественных водоемах дельты Волги. – Тр. Ин-та микробиол., 1955, вып. 4, с. 196–201.
- З а й ц е в Ю.П. Жизнь морской поверхности. Киев, 1974. 109 с.
- Н и к о л а е в И.И. Нейстон Онежского озера. – В кн.: Зоопланктон Онежского озера. Л., 1971, с. 262–268.
- С к о п и н ц е в Б.А. Об органических поверхностно-активных веществах морской воды. – Метеорол. и гидрол., 1939, № 2, с. 38–42.
- Ц ы б а н ь А.В. Бактерионейстон и бактериопланктон шельфовой области Черного моря. Киев, 1970. 87 с.
- N a u m a n n E. Über das Neuston des Subwassers. – Biol. Zbl., Bd37, 1917, S. 98–106.
- R u l o w W.M. Zur Methodik der Neuston Untersuchungen. – Arch. f. Hydrobiol., 1926, Bd 16, H. 3, S. 18–26.

## II. ТЕПЛОВОЙ И РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ

В.Н. Адаменко, Л.С. Александрова, Л.Ф. Изотова (ИНОЗ АН СССР),  
Л.П. Чехин (Отдел водных проблем Карельск. фил. АН СССР)

### К ОЦЕНКЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛОВОГО И ВОДНОГО БАЛАНСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННО ПОЛУЧАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ КЛИМАТОЛОГИИ ОЗЕР)

Оценка возможности климатологической интерпретации составляющих теплового и водного балансов с использованием дистанционно получаемой информации о состоянии озер и их водосборных бассейнов представляет большой интерес. Такая оценка существенна для выявления представительности получаемой дистанционно информации, с одной стороны, и для согласования рядов данных о компонентах уравнений теплового и водного балансов, получаемых традиционными методами, с данными, которые имеются или в перспективе будут получены на основе дистанционных методов, — с другой.

Не меньший интерес представляет решение задачи об оценке пространственной изменчивости компонентов уравнения теплового баланса по акватории озер. Анализ имеющихся данных (Адаменко, 1981, 1985; Изотова, 1982) показывает, что сами величины и отношения компонентов уравнения теплового баланса могут изменяться по акватории в масштабах, сопоставимых со средними многолетними для водосборных бассейнов различных природных зон.

Пути решения поставленных задач могут основываться на следующих соображениях.

Запишем уравнения теплового и водного балансов для водоемов в виде

$$R = Q(1 - \alpha) - E^* = P + LE_w + \Delta B, \quad (1)$$

$$\Delta h = x + y - E_w, \quad (2)$$

где  $Q$  — суммарная радиация;  $R$  — радиационный баланс;  $P$  — затраты тепла на турбулентный теплообмен;  $E^*$  — испарение;  $LE_w$  — затраты тепла на испарение (или его приход в результате конденсации);  $\Delta B$  — поток тепла в озеро (или из него);  $\Delta h$  — изменение уровня водоема;  $x$  — поступление влаги с осадками;  $y = x - E$  — поступление влаги со стоком в водоем (оценивается по осадкам  $x$  и заданному испарению с водосборных территорий  $E$ );  $E_w$  — испарение с водной поверхности.

По известной методике (Иванов, 1975) оценивается испарение с водосборной территории по заданным осадкам и температуре воздуха. Такие расчеты были сделаны для периода инструментальных наблюдений на водосборной территории Ладожского и Онежского озер. Сопоставление испарения с водной поверхности, рассчитанно-

го по гидрометеорологическим формулам, с испарением с водосборной территории, оцененным по Ю.Н. Иванову (1975), обнаружило между ними взаимнооднозначное соответствие, согласно которому рост испарения с водосборной территории согласован с уменьшением испарения с водной поверхности в сумме за период с апреля по октябрь. Такая отрицательная корреляция между  $E_w$  и  $E$ , не следующая на первый взгляд из априорных соображений, может быть объяснена следующими обстоятельствами. В летнее время единственным ограничением для испаряемости является суммарная радиация и радиационный баланс, которые определяют возможный максимум испарения с водных поверхностей. Для испарения с суши существенным ограничением является доступность и наличие влаги для испарения с водосборных территорий. При увеличении осадков испарение с суши в летнее время, когда повышена продолжительность солнечного сияния, возрастает. Об этом свидетельствует и наличие положительной корреляции с коэффициентом  $r \geq 0,85$  ( $\pm 0,02$ ) между испарением с суши  $E$  и количеством осадков  $x$ , полученной на основании обработки всех имеющихся данных об осадках и рассчитанного испарения с суши  $E$ . Таким образом, по-видимому, в теплое время года при увеличении осадков и облачности уменьшается радиационный баланс водоемов и температура их поверхности, что и обуславливает уменьшение испарения с озер в условиях аномально влажных лет при относительно большом испарении с водосборных территорий в такие годы.

С учетом выявленной связи

$$E_w = -\alpha_1 E + b_1, \quad (3)$$

где  $\alpha_1, b_1$  — эмпирические коэффициенты, полученные по материалам Ладожского и Онежского озер. По рассчитанному испарению с водосборов ( $E$ ) было оценено испарение с водной поверхности ( $E_w$ ). Поступление влаги со стоком определено по разности

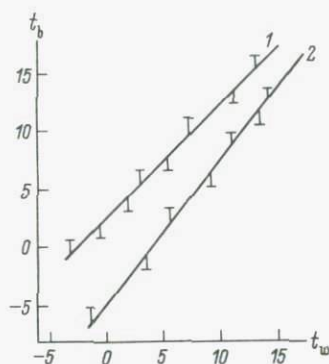
$$y = x - E. \quad (4)$$

Таким образом, были получены все необходимые компоненты водного баланса, подстановка которых в уравнение (2) позволила оценить изменения уровня озер за период инструментальных наблюдений и сравнить его с фактическим, наблюдаемым. Изменения уровня, оцененные таким методом, согласуются (с коэффициентом корреляции выше 0,8) с фактическими изменениями уровня Ладожского озера за весь период наблюдений и довольно четко отражают периоды резких изменений знака и скорости изменения уровня во времени. Это указывает на возможность оценки составляющих водного баланса по заданным температуре воздуха  $t_B$  и осадкам  $x$ , данным наблюдений за прошлые годы, а в перспективе и по дистанционным данным.

Возможная схема такого расчета, а также расчета составляющих уравнения теплового баланса (1) может заключаться в следующем.

Рис. 1. Соотношение температуры воды ( $t_w$ ) и воздуха ( $t_b$ ) на крупных озерах Северо-Запада СССР.

1 - июнь-июль; 2 - август-декабрь.



По дистанционно измеренной радиационной температуре  $t_R$  определяется температура воды  $t_w$ . Между температурой воды  $t_w$  и воздуха  $t_b$  выявлена связь (рис. 1), имеющая вид:

$$t_w = \alpha_2 t_b + b_2, \quad (5)$$

где  $\alpha_2$ ,  $b_2$  - эмпирические коэффициенты, полученные на основании обработки материалов наблюдений на Ладожском и Онежском озерах. По оцененной радиационной температуре  $t_R$  и температуре воды  $t_w$  можно определить температуру воздуха  $t_b$ . Приход тепла вследствие турбулентного тепло- и влагообмена над озерами (рис. 1) оценивается по выражению

$$P + LE_w = \alpha_3 t_b + b_3, \quad (6)$$

где  $\alpha_3$ ,  $b_3$  - эмпирические коэффициенты.

Получаемые оценки могут быть проконтролированы другим способом на основании параметризации (рис. 2), согласно которой

$$P + LE_w = \alpha_4 B_k + b_4 = \alpha_5 R_w + b_5, \quad (7)$$

где  $B_k$  - поглощенная коротковолновая радиация;  $R_w$  - радиационный баланс. Таким образом, задание радиационного баланса  $R_w$  или поглощенной коротковолновой радиации  $B_k$  позволяет дать оценку прихода тепла вследствие турбулентного тепло- и влагообмена  $P + LE_w$ .

Величина поглощенной коротковолновой радиации может быть оценена дистанционно по измерениям общего альбедо  $\alpha$ , а по заданной температуре воды  $t_w$  и воздуха  $t_b$  можно оценить эффективное излучение  $E^*$ , что позволяет рассчитать радиационный баланс

$$R = B_k - E^* = B_k(\alpha) - E^*(t_b, t_w). \quad (8)$$

Поток тепла  $B$ , поступающий или выходящий из озера в различные временные интервалы, может быть определен по соотношению

$$\Delta B = R - (P + LE_w). \quad (9)$$

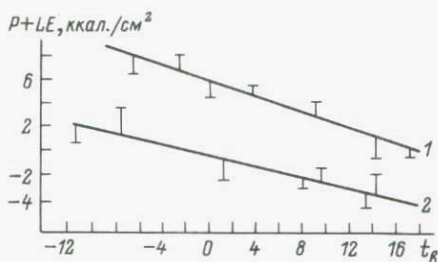


Рис. 2. Суммарный поток тепла, обусловленный турбулентным теплообменом ( $P+LE$ ) в зависимости от температуры воздуха ( $t_{\text{в}}$ ) на Ладожском и Онежском озерах.

1 - сентябрь-ноябрь; 2 - апрель-июнь.

Суммарная радиация  $Q$  оценивается по известной на основании данных нефанализа общей облачности  $n$  (или по продолжительности солнечного сияния  $\tau$ ).

Таким образом, составляющие теплового и водного балансов могут быть оценены по информации, получаемой дистанционно на основании спутниковых данных или наблюдений с самолетов и вертолетов. Для расчетов желательно иметь оперативно получаемую информацию о термическом состоянии деятельных поверхностей, осадках, альбедо и облачности. Алгоритмы, которые могут быть построены на основании имеющихся параметризаций, позволят решать задачи климатологической оценки составляющих теплового и водного балансов озер и их водосборных территорий.

Задание прозрачности водоема по данным дистанционных измерений и сопоставление ее с полученной традиционным способом по белому диску, как представляется, могло бы быть перспективным для оценки характеристик вод озер на основании параметризаций между показателями ослабления света в различных участках спектра и целым набором гидрофизических параметров, которые получены на базе экспериментальных работ Л.П. Чехина, выполненных на водоемах различных природных зон (водоемы Карелии и Северо-Запада СССР, водохранилища Волги, озера Таймыр, Байкал, Севан, водоемы Дальнего Востока и др.).

При решении ряда гидрофизических задач очень существенно знать особенности волнения и ветрового режима. Дистанционные методы позволяют оценивать эти параметры локаторами бокового обзора и специальной аппаратурой, использующей возможности нелинейной оптики. Однако в лимнологии эти подходы еще далеки от реализации. В качестве первого приближения можно считать параметризацию характеристик волнения и ветра путем сравнения с данными, которые могут быть получены оперативно на основании уже применяющихся дистанционных методов.

По экспериментальным данным, полученным на водоемах от севера до юга и представляющих самые различные природные зоны, выявлено наличие согласованности между общим альбедо  $\alpha$ , которое может быть оценено на основании относительно простых дистанционных наблюдений  $Q$ , и такими параметрами, как  $h_{\odot}$  - высота Солнца,  $n$  - общая облачность (в баллах),  $h_{\text{в}}$  - высота волне-

ния (в метрах),  $m$  - количество взвешенного вещества (в мг/л),  $h_{\text{пр}}$  - прозрачность по белому диску (в метрах),  $\beta$  - цветность воды (в градусах платиново-кобальтовой шкалы). Степень согласованности (при распределении вышеназванных параметров по нормальному или логнормальному закону) достаточно строго может быть оценена коэффициентами корреляции между альбедо  $\alpha$  и  $h_{\odot}$ ,  $h_{\text{в}}$ ,  $m$ ,  $h_{\text{пр}}$ ,  $n$  и  $\beta$  в виде выборки

$h_{\odot}$	$n$	$h_{\text{в}}$	$m$	$h_{\text{пр}}$	$\beta$
-0,006	<u>-0,415</u>	<u>-0,201</u>	<u>0,169</u>	<u>-0,459</u>	0,092,

где двумя чертами подчеркнуты коэффициенты корреляции, значимые на уровне выше 99% (для  $n$  и  $h_{\text{пр}}$ ), одной чертой - на уровне 95% ( $h_{\text{в}}$ ) и волнистой - на уровне 90% ( $m$ ).

Таким образом, в множественное уравнение регрессии с наибольшим весом должны входить данные об облачности  $n$  и высоте волнения  $h_{\text{в}}$ .

Между общим альбедо  $\alpha$  и параметрами  $h_{\odot}$ ,  $n$ ,  $h_{\text{в}}$ ,  $m$ ,  $h_{\text{пр}}$ ,  $\beta$  уравнение множественной регрессии имеет вид

$$\alpha = 22.4 + 0.02h_{\odot} - 0.6n - 2.2h_{\text{в}} + 0.005m - 1.9h_{\text{пр}} - 0.07\beta. \quad (10)$$

Задание параметров  $h_{\odot}$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $h_{\text{пр}}$ ,  $\beta$  позволяет оценить  $h_{\text{в}}$  на уровне выше 99% с коэффициентом множественной корреляции  $R = 0.975 + 0.025$ .

С учетом параметризации (10) может быть предложен следующий путь оценки высоты волнения  $h_{\text{в}}$ , а через него - и ветра в приземном слое. На основе измерений общего альбедо  $\alpha$ , облачности  $n$  и прозрачности ( $h_{\text{пр}}$ ) в предположении малой пространственной изменчивости цветности  $\beta$  и задании среднего для водоема или его района количества взвеси  $m$ , о которой можно судить и на основе дистанционных данных, может быть оценено волнение  $h_{\text{в}}$ , а через него и ветер  $v$ .

Таким образом, пространственно-временная изменчивость составляющих теплового и водного балансов может быть оценена на основании дистанционно получаемой информации применительно к водоему, который изучен с точки зрения согласованности, существующей между компонентами теплового и водного балансов. На озерах Северо-Запада СССР решение такой задачи возможно, так как для них получены соответствующие параметризации, рассмотренные в данной работе.

Наиболее информативными признаками состояния массо-энергообмена озер следует считать информацию о пространственно-временной изменчивости облачности  $n$  и температуре деятельной поверхности  $t_w$  озер и их водосборных территорий.

Информация об общем альбедо  $\alpha$ , прозрачности  $h_{\text{пр}}$ , цветности  $\beta$  и количестве взвешенных веществ  $m$  в водоеме дает возможность оценить высоту волнения  $h_{\text{в}}$  и рассчитать на этой основе поля ветра  $v$ .

## Л и т е р а т у р а

- А да мен ко В.Н. Мелиоративная микроклиматология. Л., 1981. 184 с.
- А да мен ко В.Н. Климат и озера. Л., 1985. 269 с.
- И ва но в Ю.Н. Метод расчета месячных сумм испарения с поверхности суши. - Тр. СрНИГМИ, 1975, вып. 25(106), с. 49-62.
- И зо то ва А.Ф. Турбулентный тепло- и влагообмен больших озер. Л., 1982. 144 с.

А.И. Тихомиров

### ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМОВ

Совершенствование способов измерения физических характеристик позволяет шире раскрыть наши познания о явлениях и процессах окружающего мира и более глубоко изучить их для практических целей. Это целиком относится к изучению особенностей внутренних водоемов, и в частности к их термическому режиму.

Определение температуры поверхности водоемов дистанционными методами отличается от контактных измерений тем, что первые из них дают представление о температуре тонкого, пленочного (скин-) слоя, в 2-3 раза превосходящего по толщине длину волн (6-15 мкм) инфракрасного излучения поверхности воды. Измерение температуры поверхности воды контактным способом производится в верхнем слое, на глубине одного-двух десятков сантиметров. Методика измерения температуры этого слоя определена инструкциями для гидрометеорологических станций и постов. Методика измерения радиационной температуры поверхности воды еще не регламентирована, используемые при этом радиометры не стандартны, режим каждой съемки исполнитель устанавливает сам и т.д.

Для отличия и краткости можно температуру, измеряемую ИК-радиометрами, называть радиационной температурой воды, что часто и делается, а под температурой поверхности понимать температуру верхнего слоя воды, измеряемую контактными термометрами.

Значения измеренной и расчетной температур поверхности воды ( $T_{\Pi}$ ), с вероятной точностью ее определения, характеризуют в известной степени среднюю температуру поверхности акватории за некоторый промежуток времени (сутки, декада, месяц и более). Такие значения  $T_{\Pi}$  использовались и используются для расчета тепловых процессов, отдельных составляющих теплового баланса, а также для суждения об изменении температуры воды по глубине, для определения ее влияния на физические и биологические процессы. С появлением аппаратуры для измерения радиационной температуры воды правомерность значений  $T_{\Pi}$  стала оспариваться. Веро-

ятно, такие возражения справедливы в отношении интенсивности тепловых процессов, протекающих на границе вода-воздух (лучистого теплообмена, испарения, конденсации и турбулентного теплообмена). Однако радиационная температура воды более изменчива, чем температура поверхности воды, поэтому средние значения первой, необходимые для расчета тепловых процессов, трудноопределимы. Поэтому приведение радиационной температуры к температуре поверхности остается одной из важных проблем термических исследований водоемов.

Значения радиационной температуры воды меняются в зависимости от высоты Солнца, облачности, температуры и влажности воздуха, скорости ветра и волнения, прозрачности и цвета воды, а также от других причин. Изменчивость радиационной температуры под воздействием различных факторов служит косвенным показателем для изучения самих этих факторов, что часто используется при дистанционных измерениях.

Дистанционное определение радиационной температуры дает возможность изучать пространственное распределение температуры воды на больших акваториях, уточнять прогнозы температуры воды, погоды, льдообразования, позволяет судить о распределении тепла по глубине водоема, косвенно анализировать динамику водных масс, определять рыбопромысловые районы.

В Советском Союзе радиометры используются с 1963 г. Сейчас на смену ИК-радиометрам „Мир-3“ приходит радиометр „Мир-5“ и ряд других. Входят в практику исследований ИК-радиометры, проводящие измерения либо одновременно на двух спектральных диапазонах, либо при других углах визирования. Одновременное получение двух отсчетов позволяет учесть влияние атмосферы и измерить радиационную температуру с точностью до 0,2 К.

При измерении радиационной температуры воды радиометром „Мир-3“ скорость самолета составляет 200 км/ч, высота полета 200 м. Радиометр имеет угол „зрения“  $10^{\circ}$ , время инерции прибора 1 с. При указанном режиме полета самолета за 1 с радиометр регистрирует температуру пятна воды  $56 \times 56$  м. Радиометр, установленный на судне на высоте 5 м, „видит“ пятно воды площадью  $1 \text{ м}^2$ , а при движении судна за промежуток времени в 1 с — полосу воды площадью приблизительно  $4 \text{ м}^2$ . Таким образом, радиометр, установленный на самолете, „видит“ пятно воды в 750 раз больше по площади.

Достоверно неизвестно, насколько отличаются показания радиометров, установленных на самолете и судне в один и тот же момент времени при одинаковом состоянии водной поверхности. Для выяснения этого вопроса удобно использовать привязной аэростат подъемной силой 100–200 кг. На таком аэростате можно разместить дистанционные приборы для получения иных характеристик водной среды. Запуск такого аэростата возможен с верхней палубы судна или с буксируемой им баржи. Использование указанных средств подъема приборов гарантировало бы высокий уровень достоверности исследований и облегчило бы решение проблемы связи дистанционных

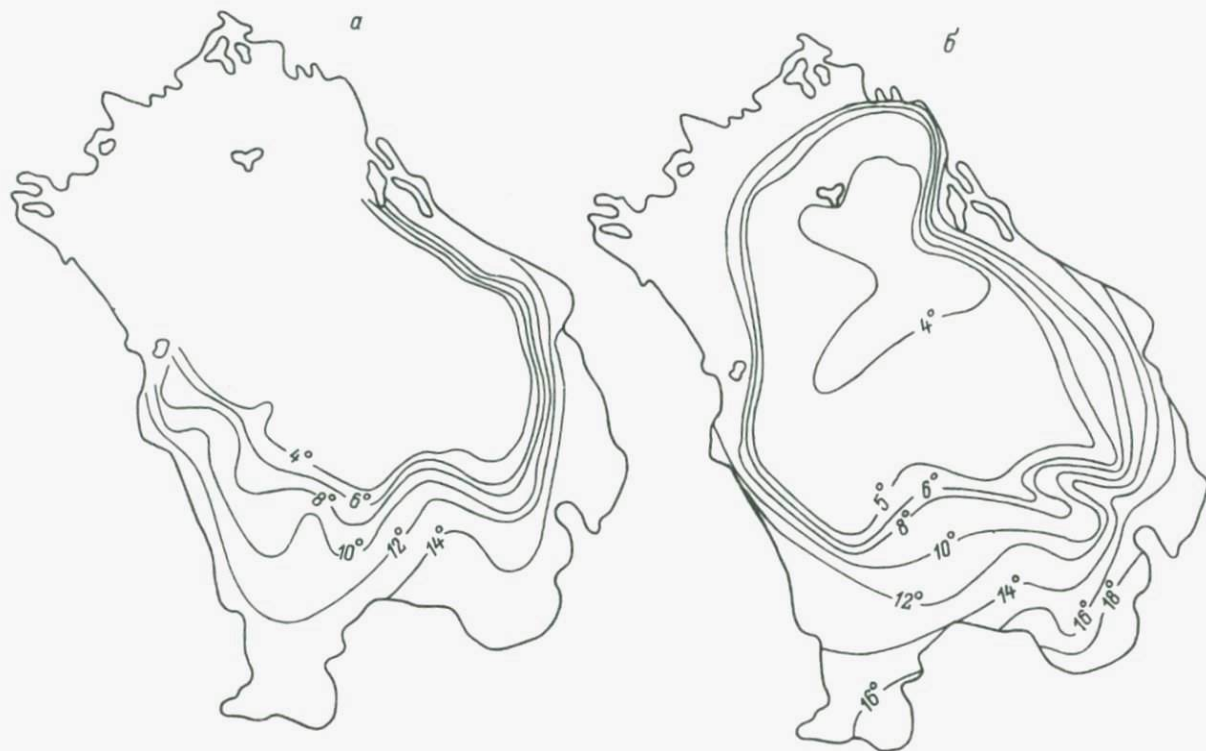


Рис. 1. Термическая структура поверхности воды Ладожского озера 31 мая 1983 г.

а - по расчетным данным; б - по данным авиатермосъемки.

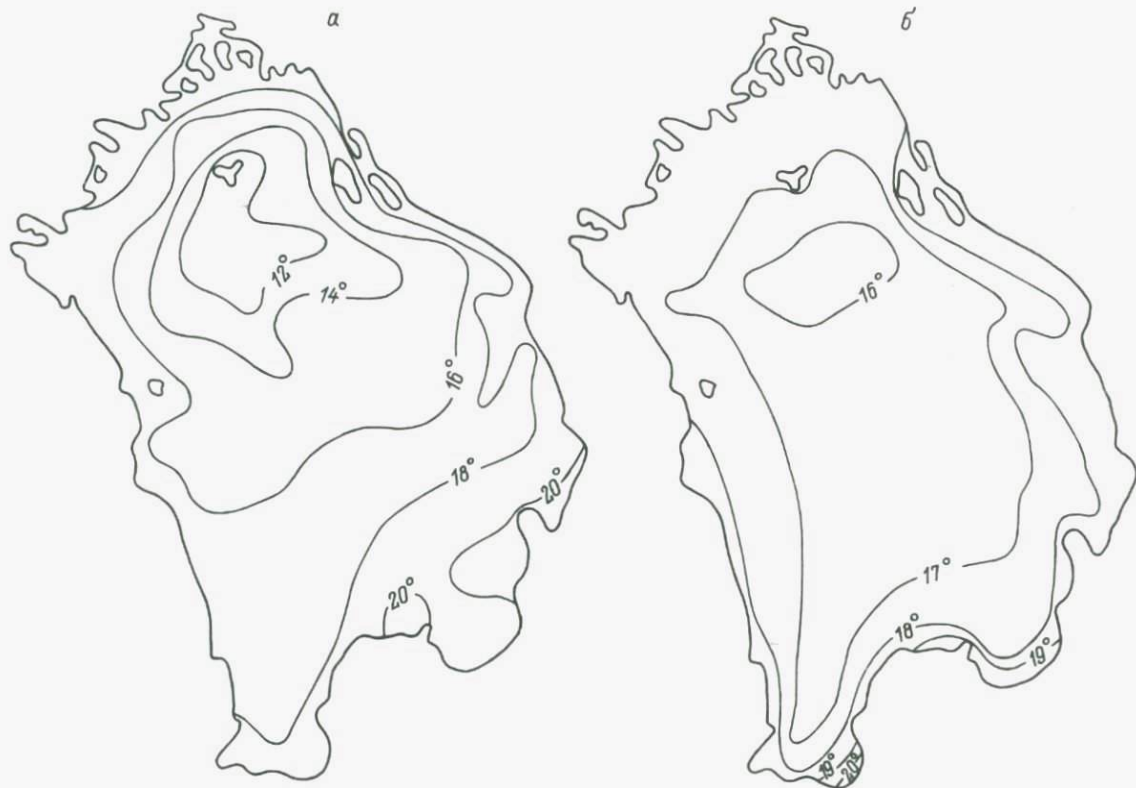


Рис. 2. Термическая структура поверхности воды Ладожского озера.

а - по данным судовой съемки 2-5 августа 1981 г.; б - по данным авиатермосъемки 5 августа 1981 г.

Значения вычисленной температуры поверхности ( $T_n$ ) и радиационной температуры ( $T_p$ ) воды ( $^{\circ}\text{C}$ ), полученной при авиатермосъемках Ладожского озера в 1983 г.

Дата съемки	$T_n$ , пост о-ва Сухо	Пределы изменения $T_p$	Пределы изменения $T_n$	Средняя $T_p$	Средняя $T_n$	$T_n - T_p$
5 05	4,3	4,1-9,0	2,2-7,5	5,2	3,9	-1,3
31 05	12,0	3,2-19,0	2,5-13,2	7,3	6,8	-0,5
13 07	20,3	16,0-22,0	14,6-20,0	19,0	19,6	-0,6
20 07	17,0	8,0-18,0	10,4-16,4	13,3	15,6	2,3
17 08	17,5	13,0-17,0	15,8-18,0	15,3	17,3	2,00
7 09	14,5	10,0-14,0	14,3-15,4	12,4	14,6	2,2
21 09	13,0	11,0-13,7	12,9-13,8	11,7	13,0	1,3
8 10	7,4	5,8-8,0	7,3-8,3	6,8	7,6	0,8
1 11	5,1	3,2-5,8	5,5-6,7	5,1	6,0	0,9

и контактных способов измерений ряда физических и других характеристик водоемов.

Судовые термосъемки на коротких отрезках пути отражают мелкомасштабные, а на поперечных разрезах - мезомасштабные термические неоднородности поверхности воды. Данные за несколько суток трудно привести к одному физическому моменту так же, как и данные радиационной температуры по авиатермосъемкам к температуре поверхности воды. Поэтому наиболее приемлемый способ сравнения тех и других данных - оценка общей термической структуры, сравнение конфигурации и расположения изотерм и средних значений  $T_n$  воды всего водоема.

Сравнение судовых и самолетных термосъемок Ладожского озера (рис. 1 и 2) за ряд лет с вычисленными значениями  $T_n$  над глубинами 20, 30, ... м и средних значений  $T_n$  всего озера по уравнениям связи  $T_n$  на о-ве Сухо с температурой поверхности по акватории этого водоема, приведенной в работе А.И. Тихомирова (1982), указывает на то, что в период интенсивного нагревания в мае-июне на Ладожском и Онежском озерах радиационная температура и ее средние значения выше, а с середины июля ниже температуры поверхности воды озера (таблица).

В таблице приведены даты авиатермосъемок, средняя суточная  $T_n$  воды на посту о-ва Сухо, даны пределы изменения радиационной температуры, снятой с картосхем авиатермосъемок, а также вычисленной по уравнениям связи между значениями температуры воды поста Сухо и температуры поверхности воды над изобатами 20, 30 и более метров. Отрицательные значения превышений указывают на более высокие значения радиационной температуры, а

положительные — наоборот. Первые относятся к периоду интенсивного нагревания озера — маю—июню, а вторые — к периоду умеренного нагревания и периоду охлаждения водоема. Приведенный пример можно считать характерным для соотношения радиационной и поверхностной температур в безледный период для Ладожского и Онежского озер.

А.И. Тихомиров, С.Г. Каретников (ИНОЗ АН СССР),  
А.Е. Вишневский (ЛПИ), К.П. Широков (СЗУГКС)

#### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Температура поверхности водоема позволяет судить о ряде тепловых процессов в толще воды, динамике и распределении тепла по глубине, дает возможность составить представление об условиях существования гидрофауны и гидрофлоры, активности биохимических процессов, определяющих качество воды в континентальных водоемах. Мониторинг температуры поверхности воды крупных озер и водохранилищ при использовании дистанционных методов исследования является наиболее оптимальным по синхронности и возможной частоте съемок, полноте получаемых данных по всей акватории водоема и экономической целесообразности.

Совместные исследования характеристик радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера, проведенные в конце мая—начале июня 1983 г., опирались на ранее изученные режимные термические характеристики этого водоема (Тихомиров, 1968, 1982). В период гидрологической весны в Ладожском озере, как и в других крупных глубоких озерах, возникает термический бар. Весной в прибрежных мелководных районах температура воды быстро растет и достигает 8, 10 и более градусов, в то время как в глубоководных районах она длительное время остается ниже 4 °С. Пресная вода, как известно, при 4 °С имеет наибольшую плотность. Весной и осенью при наличии теплых и холодных вод с температурой выше и ниже температуры наибольшей плотности вдоль побережья в озере образуется фронт (зона) смешения этих вод. При этом вода с 4-градусной температурой как бы тонет среди окружающей ее более легкой, непрерывно поступающей в зону смешения, и таким образом поддерживается течение от поверхности до дна. Явление термобара устойчиво и существует на Ладожском озере длительное время — с начала мая до середины июля. Фронт, или полоса смешения, по мере прогревания воды весной и охлаждения ее осенью постепенно перемещается на большие глубины.

Термобар делит озеро в горизонтальной плоскости на теплоактивную (ТАО) и теплоинертную (ТИО) области. Полоса смешения при термобаре может фиксироваться на поверхности воды пеной, кон-

центрацией нефтяной пленки, остатками прошлогодней травы и другими предметами и иногда проявляется на снимках, сделанных с искусственных спутников Земли (Куприянов, Прокачева, 1976).

Водные массы ТАО и ТИО резко отличаются по физико-химическим и гидробиологическим показателям за счет различия температуры и поступления в ТАО вод весеннего половодья. При постоянном перемещении фронта термобара трудно проследить происходящие изменения, процессы и динамику вод в Ладожском озере с помощью судовых наблюдений. Дистанционные методы позволяют увидеть картину в целом и следить за ее развитием. При этом нужно иметь в виду, что сначала в прибрежном районе, а затем постепенно и в более глубоководных образуются устойчивая прямая температурная стратификация вод, при которой температура воды верхнего слоя более высокая, на некоторой глубине, в слое температурного скачка (термоклина), она резко снижается, а в более глубоких горизонтах остается несколько выше  $4^{\circ}\text{C}$ . К началу летнего нагревания термобар полностью исчезает.

Таким образом, водная масса озера делится термобаром на ТАО и ТИО, а слоем температурного скачка в вертикальной плоскости — на эпилимнион и гиполимнион.

Поскольку температура воды в ТИО остается постоянно ниже  $4^{\circ}\text{C}$ , нагревание воды в этой области происходит при свободной конвекции, обеспечивающей равномерное распределение тепла по всей глубине. На Ладожском озере в конце мая—начале июня термобар располагается над глубиной более 30 м, средняя глубина ТИО составляет более 70 м. В это время интенсивность теплового потока в воду достигает  $220 \text{ Вт/м}^2$  ( $0,45\text{--}0,48\text{--}4,19 \text{ кДж/см}^2\cdot\text{сут}$ ). При указанном тепловом потоке и средней глубине ТИО на нагревание воды в этой области на  $1^{\circ}\text{C}$  требуется не менее 15 сут. Вследствие этого обширная центральная часть Ладоги длительное время представляет собой однородную по температуре поверхность. Эта поверхность может служить полигоном для тарировки ИК-радиометров и приборов, измеряющих температуру подстилающей поверхности с самолета и спутника. В тот же период температура поверхности воды в прибрежных районах ТАО ежедневно растет, достигая у берегов  $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ , при этом она имеет заметный суточный ход.

Для измерения температуры поверхности воды по ходу судна за его кормой буксируется датчик электротермометра и ртутный термометр в металлической оправе, обычно применяемый в гидрологии для измерения температуры поверхности воды. В результате длительных наблюдений на Ладоге и Онеге, относящихся еще к 60-м годам, было установлено, что измерение температуры поверхности воды за кормой в кильватерной струе судна удобно и главное не вносит, как правило, искажений в показания температуры поверхности воды водоема. Это происходит потому, что осадка экспедиционных судов по корме не превышает 3 м, винт судна перемешивает этот слой воды, который сам по себе уже хорошо перемешан ветром и имеет одинаковую температуру. Действительно, в озерах весной и осенью температура верхнего слоя воды до значительных

глубин достаточно хорошо выровнена и только летом (на Ладожском озере в середине июля) в течение нескольких дней слой температурного скачка над глубоководной областью озера располагается в 1,5–2 м от поверхности. Поэтому только в этом случае могут быть искажения измеренной температуры поверхности воды при бужировке термометра за кормой судна.

Датчиком для электротермометра служит обычно термистор, показания которого регистрируются на ленте самописца КСПП-4, шкала которого поделена на 25 °С (от 0). Значения температуры поверхности воды, регистрируемые самописцем, регулярно контролируются на станциях и на ходу судна через 15 мин по показаниям ртутного термометра.

Радиационная температура поверхности озера является результатом преобразования интенсивности инфракрасного излучения водной поверхностью. При авиатермосъемках СЗУГКС использовался радиометр „Мир-3”, установленный на самолете ИЛ-14. Во время термосъемки высота полета обычно составляет 200 м над поверхностью озера при скорости полета 200 км/ч. Угол зрения у радиометра составляет 10°, диапазон измеряемой температуры – от –2° до +35°, инерция 1 с, используемый диапазон длин волн 8–12 мкм, инструментальная погрешность не более ±0,4 °С. Маршрут самолета над Ладожским озером включает пять разрезов (рис. 1) при продолжительности полета около 4 ч.

Прием данных со спутника<sup>1</sup> производился в ЛПИ им. Калинина с помощью автоматизированной системы сбора и обработки информации. В состав этой системы входят:

- источник информации – искусственный спутник Земли (ИСЗ) со сканирующей измерительной системой;
- канал передачи информации с ИСЗ на Землю (УКВ–радиоканал);
- радиоприемное устройство (УКВ–приемник);
- устройство ввода спутниковой информации;
- устройство сбора, обработки и хранения спутниковой информации (ЭВМ типа „Минск-32” или ЕС).

ИСЗ имеет следующие измерительные системы:

- 5–канальный радиометр сверхвысокого разрешения (элемент разрешения в надире около 1 км, по краям скана не более 5 км; спектральные диапазоны: 0,55–0,90, 0,725–1,10, 3,7–4,3, 10,5–11,5 мкм, пятый – резервный);
- 20–канальный ИК–радиометр;
- микроволновый радиометр;
- система сбора данных с наземных платформ;
- система зондирования атмосферы;
- система регистрации космических частиц.

ИСЗ обращается по квазиполярной орбите (наклон орбиты к плоскости экватора ~96°) и совершает около 14 витков в сутки.

<sup>1</sup>США обеспечивают Всемирную метеорологическую организацию информацией с ИСЗ NOAA в режиме среднего разрешения. В этой и следующей статьях используются данные этого ИСЗ.

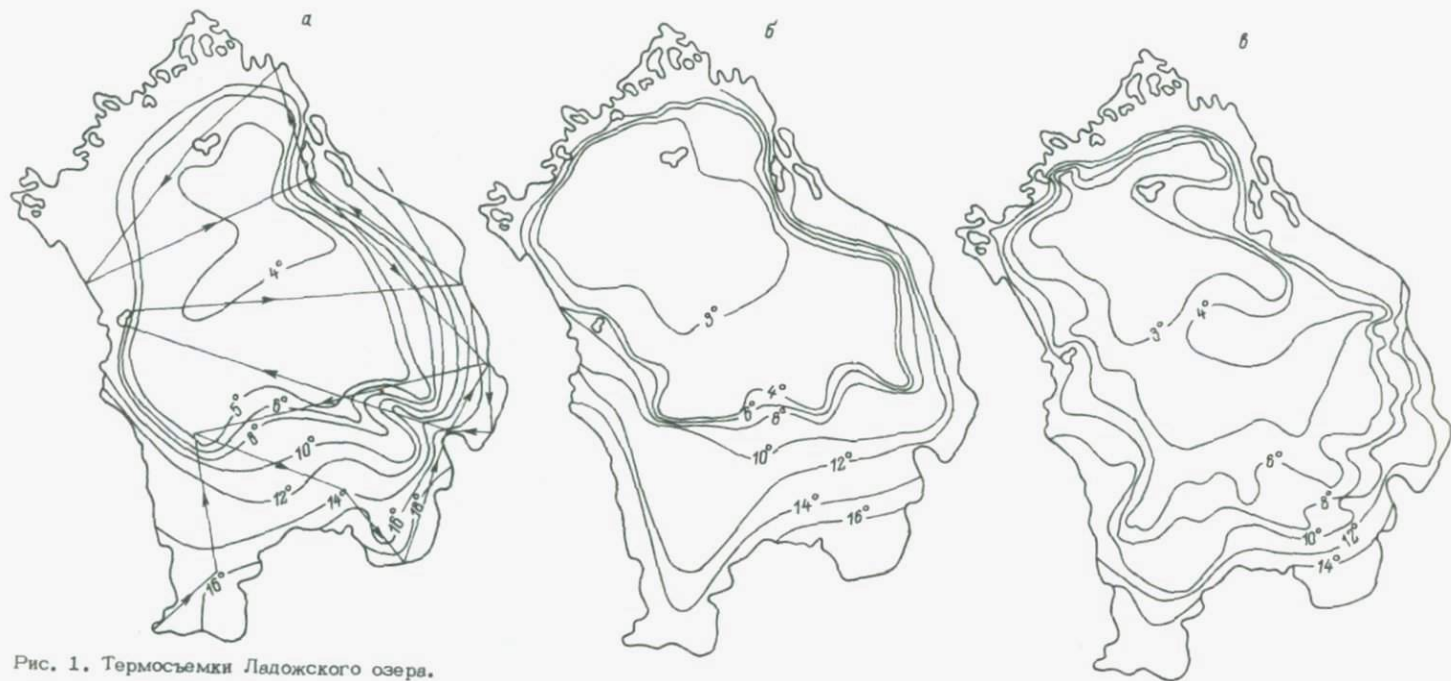


Рис. 1. Термосъемки Ладожского озера.

а - авиасъемка 31 мая 1983 г. (стрелками показан маршрут самолета); б - судовая съемка 31 мая-4 июня 1983 г.; в - спутниковая съемка 2 июня 1983 г.

Ежесуточно на широте  $60^{\circ}$  есть возможность приема информации с ИСЗ с трех последовательных витков. Как правило, одновременно функционируют два ИСЗ, один из них имеет 3 нисходящих витка (с севера на юг) в  $8+2$  ч по местному солнечному времени и 3 восходящих (с юга на север) в  $16+2$  ч, другой имеет 3 восходящих витка в  $16+2$  ч и 3 нисходящих в ночное время.

Информация передается на Землю по трем радиоканалам: каналу высокого разрешения (цифровой сигнал), каналу среднего разрешения (аналоговый сигнал) и каналу малого разрешения (цифровой сигнал). По каналу высокого разрешения передаются данные со всех систем ИСЗ в режиме непосредственной передачи, по каналу среднего разрешения — только информация двух каналов радиометра сверхвысокого разрешения (обычно каналы 2 и 4). При этом передается каждая третья строка сканирования, а для выравнивания разрешения вдоль строки производится усреднение отсчетов. По каналу малого разрешения передается информация со всех систем невысокой информационной производительности, т.е. со всех, кроме 5-канального радиометра.

Автоматизированная система принимает и обрабатывает информацию среднего разрешения (более подробные сведения по другим системам ИСЗ имеются в ряде публикаций: NOAA Technical..., 1978; NOAA Technical..., 1979). Приведем некоторые технические характеристики для этого режима передачи:

- две строки сканирования в секунду для каждого канала;
- до 900 элементов разрешения в строке;
- предельный угол сканирования  $110.8^{\circ}$ ;
- длительность нахождения ИСЗ в зоне радиовидимости 16 мин;
- разрешение вдоль строки от 2,5 до 3,6 км, в среднем 3,2 км.

Кроме того, существенны следующие величины: средняя высота полета ИСЗ над поверхностью Земли 850 км; время между последовательными витками около 1 ч 40 мин; средняя скорость полета ИСЗ по орбите 7,5 км/с; средняя скорость движения подспутниковой точки по поверхности Земли — 6,6 км/с.

Устройство ввода спутниковой информации производит поиск служебных сигналов, аналого-цифровое преобразование, формирование сигналов, управляющих вводом в ЭВМ, а также производящих временную привязку информации сеанса.

Программное обеспечение может быть разделено на программы предварительной обработки и программы тематической обработки. Программы предварительной обработки производят ввод информации с записью ее на магнитную ленту, формирование первичного изображения подстилающей поверхности, градуировку информации, географическую привязку и выдачу цифровых карт температуры.

Градуировка информации производится в два этапа следующим образом. Показания радиометра пропорциональны потоку энергии излучения в единицу времени на единицу длины волны. По калибровочным точкам определяются коэффициент пропорциональности и аддитивная поправка и вычисляется величина  $\lambda(T)$  — поток энергии излучения. На втором этапе определяется температура  $T = I^{-1}(\lambda)$ ,

где  $I^{-1}$  – обратный оператор Планка (Вишнеvский, Попов и др., 1982).

Цена деления системы определяется следующими факторами. Выход радиометра – 8-разрядное двоичное число, таким образом, возможно 256 различных уровней сигнала. В силу нелинейности функции Планка цена деления переменна и составляет от  $0,2^{\circ}$  на уровне 318 К до  $2,4^{\circ}$  на уровне 180 К при оптимальной настройке диапазона аналогового сигнала.

Для географической привязки разработаны два набора формул:

$$\begin{aligned}(\lambda, f) &= F(K, M, \vec{P}), \\(K, M) &= F^{-1}(\lambda, f, \vec{P}),\end{aligned}$$

где  $\lambda, f$  – географические координаты точки;  $K, M$  – координаты точки в массиве (строка, столбец);  $\vec{P}$  – вектор параметров орбиты ИСЗ (Вишнеvский, Тарасов и др., 1982).

Ввиду приближенности формул географической привязки погрешность может составлять от 10 до 50 км, при этом особенно сильно точность зависит от технологии привязки начала сеанса к точному времени.

Информация выдается на печатающее устройство в виде карт, представляющих собой таблицы, в которых каждое значение температуры закодировано специальными символами. В рассчитанных по формулам географической привязки местах таблицы отмечаются географические координаты и ориентиры, заданные пользователем.

Программы тематической обработки служат для решения конкретных прикладных и научно-исследовательских задач, некоторые из них созданы и включены в состав системы. Это программы статистической обработки по разрезам (Вишнеvский, Тарасов, Смирнов, 1983), позволяющие сопоставлять данные как по параллельным разрезам, так и по разрезам, полученным различными средствами измерений (контактные, самолетные); комплекс программ автоматизированного построения изолиний (Вишнеvский, Тарасов, 1983; Тарасов, Вишнеvский и др., наст. сб., с. 261–268) и другие. Этот раздел программного обеспечения может быть существенно развит только при активном участии потребителей спутниковой информации в части математической постановки задач.

Весной 1983 г. на Ладожском озере был проведен эксперимент по определению температуры поверхности воды различными способами, включающими судовые, самолетные и спутниковые наблюдения. Судовые наблюдения проводились по всей акватории Ладожского озера с большей детализацией в районах термического бара в период с 31 мая по 4 июня (рис. 1, б). Отделом авиационных исследований СЗУГКС 31 мая была проведена авиатермосъемка по стандартной сетке разрезов (рис. 1, а). Кафедрой ИУС ЛПИ им. Калинина 1, 2, 3 и 6-го июня была получена информация с ИСЗ (рис. 1, в).

Данные радиосигналов со спутника о распределении температур подстилающей поверхности после первичной обработки, описанной выше, поступали в форме закодированных таблиц. Каждый знак соответствовал определенной температуре подстилающей поверхности. При общем количестве градаций температуры равном 70 можно задаваться различной степенью точности. В данном случае использовалась распечатка по всем строчкам с точностью до  $0,5^{\circ}$ . Расстояние между строчками — 3,5 км, а между точками одного скана — 7 км. Акватория Ладожского озера при этом покрывается 700 ячейками.

Для совмещения поля температур с контуром озера использовался принцип максимального градиента температур на границе вода-суша. Эта операция необходима, так как географическая привязка знаковой таблицы осуществляется с погрешностью 10–50 км. Такой прием совмещения хорош для периода весеннего нагревания озер, когда температура поверхности суши значительно выше температуры поверхности воды, особенно в полуденное время. Хорошим ориентиром при совмещении контура озера с полем температур служат острова. Помехой для определения температуры подстилающей поверхности являются облака. Облачность выражается отрицательными температурами и исключается из поля температур поверхности озера. Если же облачность покрывает большую часть озера, то приходится отказаться от этого сеанса регистрации температуры подстилающей поверхности. По этой причине из четырех сеансов только два — 2 и 3 июня — оказались приемлемыми для сопоставления спутниковой информации со съемкой с самолета и судна.

На рис. 2 приведен расшифрованный фрагмент знаковой распечатки, относящийся к северо-восточному берегу Ладожского озера. На приведенном рисунке по температуре хорошо выделяется граница между сушей и водой, а также облачность с отрицательными температурами, которые не принимались во внимание при наведении изотерм.

Первый этап сравнения значений температуры поверхности воды, полученных при судовой съемке (рис. 1, б), и значений радиационной температуры поверхности озера, полученных при авиа- (рис. 1, а) и спутниковой (рис. 1, в) термосъемках, заключался в выделении границы между ТАО и ТИО по 4-градусной изотерме и определении температур в этих зонах. Вследствие медленного перемещения термобара по уклону дна при большой глубине его дислокации (около 50 м) за более достоверную картину положения термобара по озеру принималось распределение температуры воды по судовой термосъемке. Изменение температуры воды в ТИО за время судовой съемки, рассчитанное по методу, предложенному А.И. Тихомировым (1982), составляло в среднем  $0,3^{\circ}\text{C}$ , перемещение термобара по глубине — 6 м, а горизонтальное его перемещение — от нескольких сотен метров до 2–2,5 км (в зависимости от уклона дна). В ТАО температура поверхности, а с ней и радиационная температура воды за время термосъемок изменялась в зависимости от времени суток и погодных условий. Поэтому значения температур в ТАО,

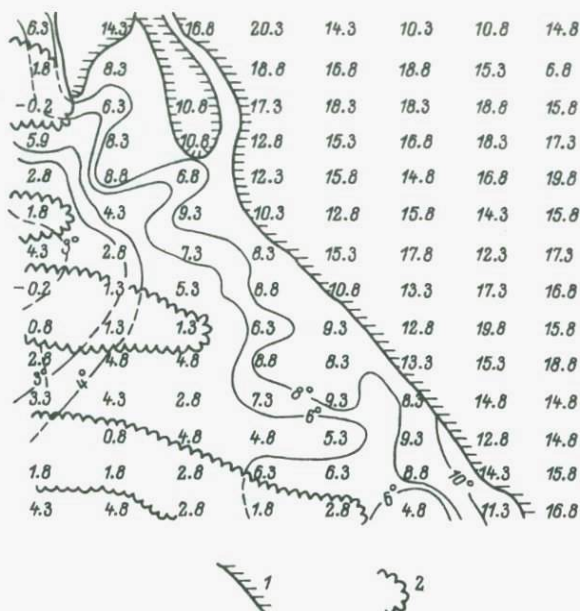


Рис. 2. Фрагмент радиационной температуры северо-восточного берега Ладожского озера 2 июня 1983 г.

Границы: 1 - берега, 2 - облаков.

измеренные дистанционным и контактными методами, имели между собой большее расхождение.

Таким образом, граница между ТАО и ТИО по 4-градусной изотерме, общая ее конфигурация и температура поверхности в ТИО в первом приближении могут служить для сравнения судовых термосъемок с данными дистанционных измерений радиационной температуры воды. Следует отметить, что судовые и спутниковые измерения удовлетворительно совпали, а данные авиатермосъемки имеют заметное несоответствие с судовыми. Положение 5-градусной изотермы по данным авиатермосъемки более соответствует 4-градусной изотерме по данным судовой термосъемки.

На втором этапе сопоставления температуры поверхности озер, полученной различными способами, производилось статистическое сравнение данных. Для этого была использована равномерная сетка с величиной ячейки 10x10 км, совпадающая с принятой разбивкой Ладожского озера на квадраты. Площадь озера при этом включала 175 узлов этой сетки. Со схем, составленных в одинаковом масштабе по данным судовой, самолетной и спутниковой термосъемок, в узлах выбранной решетки снимались температуры поверхности воды методом интерполяции между изотермами. Полученные данные сравнивались попарно: судно-самолет, спутник-самолет, суд-

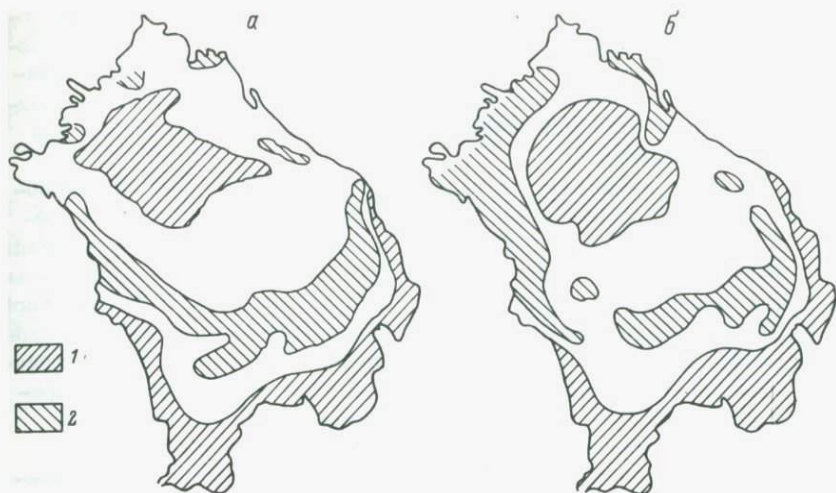


Рис. 3. Зоны корреляционной связи полей температуры воды.

а - судно-спутник, б - судно-самолет. 1 - зона корреляционной связи выше средней величины, 2 - зона отсутствующей корреляционной связи.

но-спутник. Величины коэффициентов парной корреляции получились высокими: судно-спутник - 0,90, судно-самолет - 0,85, спутник-самолет - 0,89. Эти коэффициенты корреляции относятся ко всему озеру без учета существования в озере двух различных областей - ТАО и ТИО. Для большей информативности использовалась методика сравнения гидрофизических полей, предложенная А.Ю. Тержевником (1985). Она позволяет оценить вклад имеющихся пар значений гидрофизических параметров при определении их среднего коэффициента корреляции и таким образом выделить зоны с достаточно надежным или, наоборот, малым значением связи. В результате применения этой методики были выделены зоны тесной связи и зоны с отсутствием связи между парами термосъемок (рис. 3). В итоге установлено, что в районе сгущения изотерм у термобара со стороны ТАО, где изменение температуры поверхности по акватории и во времени наибольшее, корреляционная связь между парами практически отсутствует. Район отсутствующей корреляционной связи для всех пар термосъемок занимает менее 20% всей площади озера. На остальных 80% акватории корреляционная связь оказалась выше средней.

В заключение можно отметить, что самолетная и спутниковая термосъемки Ладожского озера, проведенные во время судовой съемки, продолжавшейся несколько суток, дали материал для сравнительной оценки значений радиационной температуры и температуры поверхности воды, что позволило сделать следующие предварительные выводы.

1. При существовании термобара в Ладожском озере теплоинертная область (ТИО) по площади в несколько тысяч квадратных километров представляет собой подстилающую поверхность почти с одинаковой температурой несколько ниже 4 °С. Таким состоянием водной поверхности ТИО в течение мая-июня можно пользоваться для тарирования радиометров.

2. Значения температур и граница между ТИО и ТАО по 4-градусной изотерме, полученные по спутниковым данным, хорошо совпали с данными судовых наблюдений; по данным авиасъемки площадь ТИО была значительно меньше: 5-градусная изотерма по этой съемке почти совпала с границей между ТИО и ТАО (т.е. с 4-градусной).

3. Сравнительная статистическая характеристика полученных данных показывает, что в районе сгущения изотерм (там, где наблюдается наибольшее изменение температуры поверхности воды по времени и по акватории) корреляционная связь между радиационной температурой и температурой поверхности воды отсутствует, для остальной части озера эта связь представляется достаточно надежной.

#### Л и т е р а т у р а

- Вишневский А.Е., Попов С.С., Тарасов В.С., Филимонов В.И. Исследование температурных полей с искусственных спутников Земли. — В кн.: Автоматизация научных исследований. Горький, 1982, с. 35–38.
- Вишневский А.Е., Тарасов В.С. Обработка на ЭВМ данных со сканирующих датчиков большой информационной производительности. — В кн.: Технические средства для Государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП). Обнинск, 1983, ч. 1, с. 93–95.
- Вишневский А.Е., Тарасов В.С., Виноградов В.В., Смирнов В.Г. Автоматизированная система сбора и обработки спутниковой информации. — В кн.: Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Л., 1982, вып. 5, с. 32–37.
- Вишневский А.Е., Тарасов В.С., Смирнов В.Г. Статистический спектральный анализ данных с ИСЗ на ЭВМ. — В кн.: Технические средства для Государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП). Обнинск, 1983, ч. 1, с. 95–97.
- Куприянов В.В., Прокачева В.Г. Спутниковая информация и изучение вод суши. — Тр. ГГИ, 1976, вып. 238. 104 с.
- Тарасов В.С., Вишневский А.Е., Тутыгин В.С., Заварюхин В.В., Комиссарчук Г.П., Поделинская А.А. Методика обработки на ЭВМ результатов дистанционных измерений. — Наст. сб., с. 161–168.

- Т е р ж е в и к А.Ю. Метод выявления связанных областей в исследованиях природных объектов. - ДАН СССР, 1985, т. 282, № 1, с. 48-50.
- Т и х о м и р о в А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера. - В кн.: Тепловой режим Ладожского озера. Л., 1968, с. 144-217.
- Т и х о м и р о в А.И. Термика крупных озер. Л., 1982. 232 с.
- NOAA Technical Memorandum NES5-95. - The TIROS-N/NOAA A-4 Satellite Series. Washington, 1978. 75 p.
- NOAA Technical Memorandum NES5-07. Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers. Washington, 1979. 72 p.

А.Е. Вишнеvский (ЛПИ)

#### СРАВНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР, ПОЛУЧЕННЫХ КОНТАКТНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Спутниковые съемки позволяют оперативно получать данные о температуре больших территорий подстилающей поверхности Земли, в том числе и о температуре поверхности озер. Однако непосредственно (с судов) измеренная температура верхнего слоя воды (15-20 см от поверхности) и температура, измеренная радиометрами с самолетов и со спутников, характеризуют различную толщину слоя, что осложняет их сопоставление.

В конце мая-начале июня 1983 г. проводились синхронные съемки температур Ладожского озера с судна, самолета и искусственно-го спутника Земли (ИСЗ). Судовая термосъемка проводилась с 28 мая по 4 июня 1983 г. на четырех поперечных разрезах с детализацией в зоне максимальных градиентов путем регистрации температуры воды буксировочным датчиком на ходу судна. Авиатермосъемка СЗУГКС была проведена 31 мая 1983 г. по принятой стандартной сетке галсов. Измерения проводились несканирующим радиометром „Мир-3". Прием данных с ИСЗ проводился на экспериментальном пункте Ленинградского политехнического института (ЛПИ). Сканирующая радиометрическая аппаратура, установленная на борту ИСЗ, обеспечивает ширину полосы обзора около 2000 км и длину зоны радиовидимости до 6000 км с пространственным разрешением около 3.5 км. Для приема и обработки информации с ИСЗ использовалась разработанная в ЛПИ автоматизированная система приема, состоящая из комплекса радиоприемной аппаратуры (спиральная антенна и серийный УКВ-приемник), устройства синхронизации и ввода спутниковой информации в ЭВМ (разработка ЛПИ), ЭВМ „Минск-32" с комплексом программного обеспечения для предварительной обработки информации (более подробно см. Тихомиров, Каретников и др., наст. сб., с. 173-183).

За четыре сеанса приема спутниковой информации (1, 2, 3 и 6-го июня 1983 г.) были получены 4 цифровые карты радиационных температур подстилающей поверхности района Ладожского озера. Наиболее удачной оказалась съемка от 2-го июня.

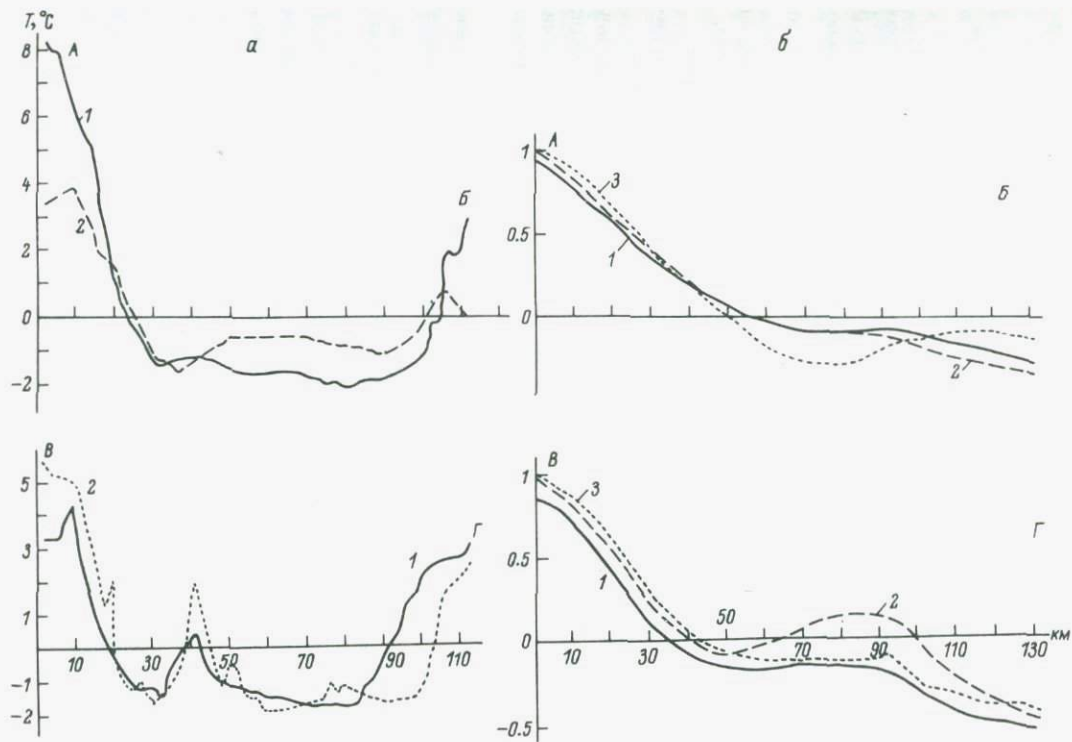
В рассматриваемый период на Ладожском озере длительное время существовала термостабильная область с температурой воды ниже 4 °С. Эта область, называемая теплоинертной, изолирована от прибрежной теплоактивной области термическим баром, приуроченным к 4-градусной изотерме. По расположению этой изотермы можно судить о соответствии полученных значений радиационной температуры и температуры верхнего слоя воды.

Сравнение проводилось в два этапа. На первом визуально сравнивались карты температур, полученные с судна, самолета и ИСЗ, приведенные к одному масштабу. При этом сравнении термостабильная область выявилась на всех трех картах, что свидетельствует о хорошем совпадении дистанционных и контактных данных. Однако ввиду существенного отличия в методах измерения, а также наличия стохастической составляющей в температурных полях непосредственное сравнение результатов измерений недостаточно.

Второй этап заключался в сопоставлении статистических характеристик полей температуры воды по разрезам. Для этого использовался комплекс программного обеспечения статистической обработки спутниковой информации, решающий следующие задачи: выбор информации по разрезу из массива спутниковой информации, двухсторонняя параметрическая фильтрация этой информации, вычисление оценок математического ожидания и дисперсии по сглаженным выборкам, расчет автокорреляционных и взаимокорреляционных функций, получение пространственных спектров. Для сравнения спутниковых данных с контактными и самолетными предусмотрен ввод последних с внешнего носителя в ЭВМ.

Для анализа были использованы данные по трем разрезам: Моторное-южная оконечность о-ва Лункулансари, устье р. Видлица-мыс Черемухин, устье р. М. Охта-маяк Быковец. Данные по каждому разрезу сопоставлялись попарно: судно-спутник, спутник-самолет, самолет-судно. Для каждой пары дополнительно рассчитывались взаимокорреляционные функции. Данные об оценках математического ожидания и дисперсии температуры по разрезу сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что по всем трем разрезам наибольшее среднее значение температуры получено с самолета (1), затем со спутника (2) и наименьшее - с судна (3). Существенный вклад в отличие судовых данных от спутниковых вносит разная физическая природа датчиков, а в отличие спутниковых от самолетных - разная толщина слоя атмосферы от подстилающей поверхности до датчика. Максимальную дисперсию дают данные с самолета, затем с судна, минимальную - со спутника. Основные различия в статистических характеристиках обусловлены отличием в средствах и способах измерения. С самолета и ИСЗ измеряется одна и та же физическая величина (радиационная температура слоя воды, толщина которого



Профили температур (а) и автокорреляционные функции (б).

A—B — р. Видлица—мыс Черемухин, B—Г — р. М. Охта—маяк Быковец. Данные получены: 1 — со спутника, 2 — с самолета, 3 — с судна.

Математические характеристики	Маяк Быковец-р. М. Охта			Мыс Черемухин-р. Видлица			О-в Лункулансари-Моторное		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Математическое ожидание	8.17	6,00	5.48	6.11	5.41	4.16	5.09	4.75	3.57
Дисперсия	3.66	1.80	2.42	2.29	1.50	1.57	2.13	1.90	2.04

составляет несколько десятков микрометров) при разных размерах элемента разрешения, а следовательно, и площади, по которой усредняется температура. Судовой датчик измеряет температуру верхнего слоя воды непосредственно, элемент разрешения в этом случае можно считать точечным.

Анализ графиков температуры по разрезам и корреляционные зависимости (рис. 1, а и б) позволяют сделать следующие выводы. Спутниковые и самолетные данные, как правило, коррелированы лучше, чем те и другие с данными судовыми. Однако для всех рядов взаимная корреляция хорошая и на малых сдвигах достигает 0,7–0,95. Все автокорреляционные функции при возрастании величины сдвига не приближаются к нулю. Это свидетельствует о неоднородности выборки и в данном случае является показателем наличия областей с существенно различающимися средними значениями температур – теплоактивной и теплоинертной.

Особо следует отметить, что данные ИСЗ хорошо отразили даже относительно небольшие характерные особенности профиля температуры.

Особый интерес представляет сопоставление данных ИСЗ и самолета с судовыми, полученными с помощью бортового радиометра. Это позволит исключить отличия, связанные с различной природой контактных и дистанционных измерений, и наметить пути по расширению области применения спутниковой информации в озероведении.

#### Л и т е р а т у р а

Тихомиров А.И., Каретников С.Г., Вишневский А.Е., Широков К.П. Сравнительная характеристика радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера. – Наст. сб., с. 173–183.

О.Б. Васильев, В.С. Гришечкин (НИИФ ЛГУ),  
К.Я. Кондратьев (ИНОЗ АН СССР)

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЫ НАД АКВАТОРИЕЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

В 1983–1984 гг. самолет–лаборатория ИЛ–14 НИИФ ЛГУ принимал участие в дистанционных исследованиях акватории Ладожского озера по комплексной программе ГКНТ СССР „Ладожское озеро–р. Нева–Невская губа“. Один из разделов программы – изучение спектральных радиационных балансов и спектрального лучистого притока тепла в свободной атмосфере над акваторией Ладожского озера. Измерения спектральных потоков излучения, альбедо, баланса и спектрального лучистого притока тепла над акваторией озера представляют значительный интерес с точки зрения исследований энергетики атмосферы над озером. Важный аспект проблемы состоит в сходстве процессов формирования полей излучения над большим озером и океаном, что позволяет рассматривать данные наблюдений над озером как имитирующие особенности переноса излучения над океаном в зависимости от изменений оптических параметров атмосферы. Подобный имитационный эксперимент в природных условиях представляет особый интерес для анализа физической природы энергоактивных зон Мирового океана (Кондратьев, Козодеров, 1984).

### 1. Методика наблюдений

К моменту начала работ по указанной программе на самолете–лаборатории ИЛ–14 было завершено создание спектральной информационно–измерительной системы (СИИС) (Балдин, Ивлев, 1976; Васильев и др., наст. сб., с. 225–238). Нахождение на борту самолета СИИС позволило видоизменить схему выполнения полетов и методику производства наблюдений, а соответственно и методику обработки результатов измерений. Существенное сокращение времени измерений позволило значительно увеличить их число для получения серии избыточных данных, дающих возможность в несколько раз увеличить точность измерений и экспериментально оценить их случайную погрешность.

Была разработана оптимальная схема измерений спектральных потоков излучения в атмосфере, согласующаяся с техническими возможностями самолета–лаборатории ИЛ–14 и СИИС. Схема полета включала два подъема и два спуска между уровнями 100–5600 м с измерениями на стандартных высотах  $H=50, 300, 900, 1900, 3000, 4200$  и  $5600$  м (т.е. в интервале уровней  $1000$  мб ( $50$  м) –  $500$  мб ( $5600$  м) через  $100$  мб) на подъемах и первом спуске и на высотах через  $100$  м на последнем спуске. Верхняя граница наблюдений определялась летно–эксплуатационными особенностями самолета, нижние – уровнем появления „болтанки“ ( $300$  м) и соображениями безопасности полета ( $50$  м). Указанная градация на–

блюдений по высоте (через 100 мб) была выбрана с тем, чтобы проводить измерения слоев атмосферы, отличающихся друг от друга на целое число атмосферных масс, а также из удобства сопоставления полученных результатов с аэрологическими исследованиями, проводимыми станциями ГУГМС.

Схема эксперимента позволила получить такое число измерений, чтобы при обработке результатов наблюдений иметь значения спектральных потоков радиации на разных уровнях атмосферы для фиксированных положений Солнца. Известно, что зависимости  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}(\psi_0)$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}(\psi_0)$  от  $\psi_0$  в диапазоне зенитных расстояний от 40 до 60° линейны в пределах ошибок эксперимента (Радиационные характеристики..., 1969). Этот факт позволил использовать линейную интерполяцию при определении величин спектральных потоков  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}(\psi_0)$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}(\psi_0)$  для выбранных моментов времени по данным измерений спектрометра К-3. Моменты времени, для которых вычисляются значения  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}(\psi_0)$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}(\psi_0)$ , выбираются так, чтобы они были близкими моментам наблюдений. В этом случае ошибки интерполяции минимальны.

После приведения всех измерений на последней ветви зондирования к одному зенитному расстоянию Солнца экстраполяцией можно стандартизировать значения потоков  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}$  по Солнцу, корректируя их по известному распределению энергии в солнечном спектре. Кроме того, подробные по высоте измерения потоков на последней ветви зондирования, как уже отмечалось, позволяют получить избыточные данные и, следовательно, существенно уменьшить погрешность получаемых значений  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}$  на стандартных 100-миллибарных уровнях путем усреднения экспериментальных величин.

До и после выполнения полетов спектрофотометры К-3 подвергались в лаборатории калибровке и стандартизации. Цель лабораторного исследования спектрометра — получение аппаратных характеристик, необходимых для редукции показаний регистрирующего прибора в нормальный спектр, выраженный в абсолютных энергетических единицах.

Для градуировки шкалы длин волн монохроматора производится отождествление реперных меток с длиной волны с помощью источников линейчатого излучения и узкополосных светофильтров, выделяющих отдельную линию в спектре источника. В качестве таковых используются: ртутно-кварцевые лампы ПРК-2 и ПРК-4 в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, неоновая лампа в видимой и ближней инфракрасной областях, а также интерференционные светофильтры.

Основным показателем качества спектральной градуировки является ее воспроизводимость и равномерность, которые обеспечиваются кинематической схемой развертки спектра. Оказалось, что ошибка градуировки шкалы длин волн составляет 0,5–1 нм, т.е. не более половины ширины спектральной щели монохроматора.

Спектральная градуировка монохроматора в процессе натурных наблюдений периодически проверяется с помощью ртутной лампы УФО, установленной в спектрометре.

В результате абсолютной калибровки спектрометра определяется цена деления шкалы регистрирующего прибора в абсолютных единицах энергии, поступающей на вход спектрометра, при этом чувствительность фиксирована и контролируется с помощью вторичного эталонного сигнала. Источник вторичного эталонного сигнала — лампа с вольфрамовой нитью накаливания — является составной частью спектрофотометра. Спектральная зависимость цены деления сигнала на входе регистрирующего устройства дает переводные множители от редуцированного спектра к нормальному. Абсолютная калибровка спектрофотометра фактически сводится к определению спектральных потоков вторичного эталонного источника в абсолютных единицах при строгой стабилизации режима питания последнего. В качестве стандартной лампы, поток которой сравнивался со вторичным эталоном спектрометра, использовалась ленточная лампа накаливания СИ-10, прокалиброванная по высокотемпературному черному телу в ГАИШ МГУ. Питание лампы СИ-10 осуществляется от специального стабилизатора МТКС-35 (напряжение поддерживается с точностью 0,1%).

Спектрофотометр К-3 подвергается абсолютной калибровке вместе со световодом, причем отдельно верхнее и нижнее колена световода. Однако в процессе эксперимента оптические свойства колена могут изменяться. Поэтому для гарантии правильности калибровки всего прибора осуществлялась регулярная проверка отношений чувствительности верхнего и нижнего колена с помощью внешнего источника излучения — внешнего вторичного эталона.

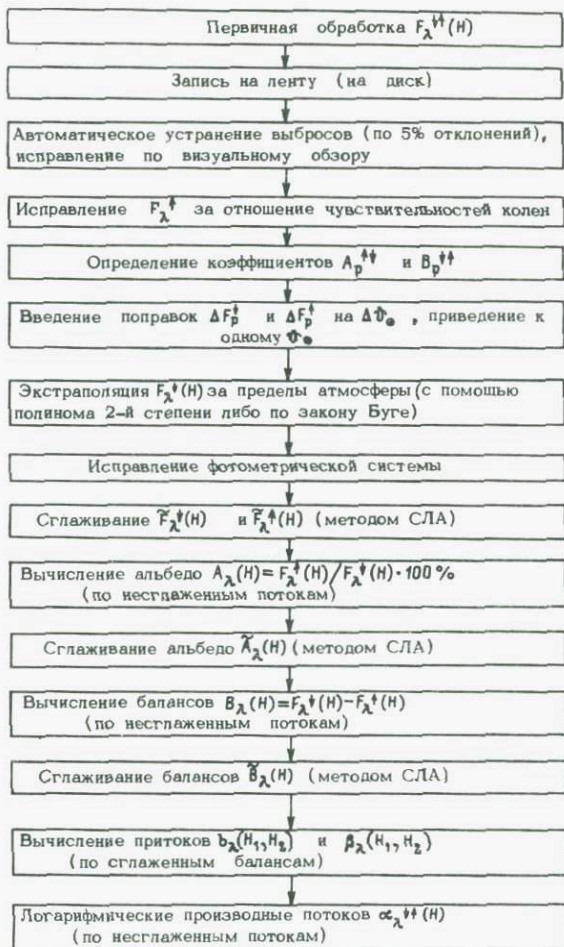
## 2. Статистическая обработка измерений и вычисление спектральных радиационных характеристик атмосферы

Получаемая в процессе измерений информация подвергается первичной обработке на ЭВМ ДЗ-28. Задача первичной обработки — получение нормальных спектров в абсолютных энергетических единицах.

Нормальные спектры  $F_{\lambda, H}^{\dagger}$  и  $F_{\lambda, H}^{\ddagger}$ , полученные в результате первичной обработки, в дальнейшем обрабатываются на ЭВМ большей мощности: СМ-4, ЕС-1033 и др. Блок-схема алгоритма обработки падающих и восходящих спектральных потоков излучения, измеренных с помощью СИИС, приведена ниже.

Вначале все исходные данные выводятся на цифровую печать в виде таблиц, в которых представлены абсолютные значения нисходящих и восходящих потоков по набору длин волн, соответствующему данному прибору К-3, и по высотам зондирования.

Визуальный контроль данных позволяет выявить грубые промахи в отдельных сериях наблюдений; грубые промахи в отдельных измерениях исключаются автоматически по отклонению более чем на 5% от сглаженной кривой полиномом 2-й степени (в таком случае возможно исключение не только одного, но и нескольких последовательных грубых промахов). Выпадающие значения заменяются, если это возможно, значениями, полученными линейной интерполяцией. После



выявления и возможного исправления грубых промахов материал распечатывается еще раз для повторного визуального контроля.

Далее сигналы восходящих потоков  $F_H^{\dagger}(\lambda)$  исправляются за отношение чувствительности верхнего и нижнего колена световода (если это не было сделано при первичной обработке):  $[F_H^{\dagger}(\lambda)]_{испр} = \gamma(\lambda) \cdot F_H^{\dagger}(\lambda)$  (поправочная функция  $\gamma(\lambda)$  задается таблицей). Результаты исправлений восходящих потоков  $[F_H^{\dagger}(\lambda)]_{испр}$  вновь выдаются на печать в виде таблицы.

Исходя из существования линейной зависимости нисходящих и восходящих спектральных потоков от зенитного расстояния Солнца  $\mathcal{V}_0^h$ , наблюдения на отдельных спусках и подъемах пересчитываются к одним значениям  $\mathcal{V}_0^h$ , например к тем  $\mathcal{V}_0^h$ , которые соответствуют моментам нахождения самолета на наибольшей, средней или наименьшей высоте полета. Для этого для высот, соответствующих

уровням в атмосфере через 100 мб, по методу наименьших квадратов, МНК (если число спусков и подъемов больше двух), находятся коэффициенты  $A_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  и  $B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  уравнения линейной регрессии

$$F_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}(\psi_{\odot}) = A_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow} + B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow} \cdot \psi_{\odot}.$$

Затем для коэффициента  $B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  строится полиномиальное представление (как правило, параболой 2-й степени)

$$B_{\lambda,p}^{\uparrow\uparrow} = B_{0,\lambda}^{\uparrow\uparrow} + B_{1,\lambda}^{\uparrow\uparrow} \cdot p + B_{2,\lambda}^{\uparrow\uparrow} \cdot p^2$$

и с его помощью рассчитываются сглаженные коэффициенты  $B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  не только для уровней через 100 мб, но и для уровней через 100 м (при выполнении последнего, „подробного“, спуска). Коэффициенты  $B_{0,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$ ,  $B_{1,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$ ,  $B_{2,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  вычисляются по МНК. Таблица значений коэффициентов  $A_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  и  $B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  для уровней через 100 мб и только  $B_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}$  для уровней через 100 м выводится на печать.

На рис. 1, а-г показаны зависимости  $B_{\lambda,H}^{\uparrow\uparrow}(H)$  и  $B_{\lambda,H}^{\uparrow\uparrow}(\lambda)$ , полученные для наблюдений, выполненных над экваторией Ладожского озера 22 мая 1983 г. Выбросы функций  $B_{\lambda,H}^{\uparrow\uparrow}(\lambda)$  на  $H=50$  м вызваны „болтанкой“ самолета на этой высоте полета. Анализ рисунков (см. рис. 5) показывает, что для падающих потоков  $F_p^{\downarrow}(\lambda)$  зависимость от  $\psi_{\odot}$  более чем на порядок сильнее аналогичной зависимости для восходящих потоков  $F_p^{\uparrow}(\lambda)$ . Это так и должно быть, так как в падающем потоке вклад прямого солнечного излучения значительно больше, чем диффузного, в то время как восходящий поток полностью диффузный. Однако ввиду того что сами величины восходящих потоков над водной поверхностью примерно в 20 раз меньше падающих, то относительные величины поправок при приведении измерений к фиксированным значениям  $\psi_{\odot}$  оказываются одного порядка – в maximum примерно до 5%, что на порядок или в 2-3 раза больше погрешностей измерений.

После выбора зенитных расстояний Солнца  $\psi_{\odot}^{(1)}, \psi_{\odot}^{(2)}, \dots, \psi_{\odot}^{(i)}$ , к которым будут приводиться наблюдения, выполненные при разных  $\psi_{\odot}(t)$ , расчет поправок к наблюдаемым значениям потоков осуществляется по формуле

$$\Delta F_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow}(t, i) = \tilde{B}_{p,\lambda}^{\uparrow\uparrow} \cdot [\psi_{\odot}(t) - \psi_{\odot}^{(i)}].$$

Значения потоков, приведенные к одному зенитному расстоянию  $\psi_{\odot}^{(i)}$ , выводятся на печать.

После приведения наблюдений во время „подробного“ спуска к одному значению  $\psi_{\odot}^{(i)}$  следует операция экстраполяции падающего потока  $F_{\lambda}^{\downarrow}(p)$  за пределы атмосферы с последующей стандартизацией наблюдений по Солнцу.

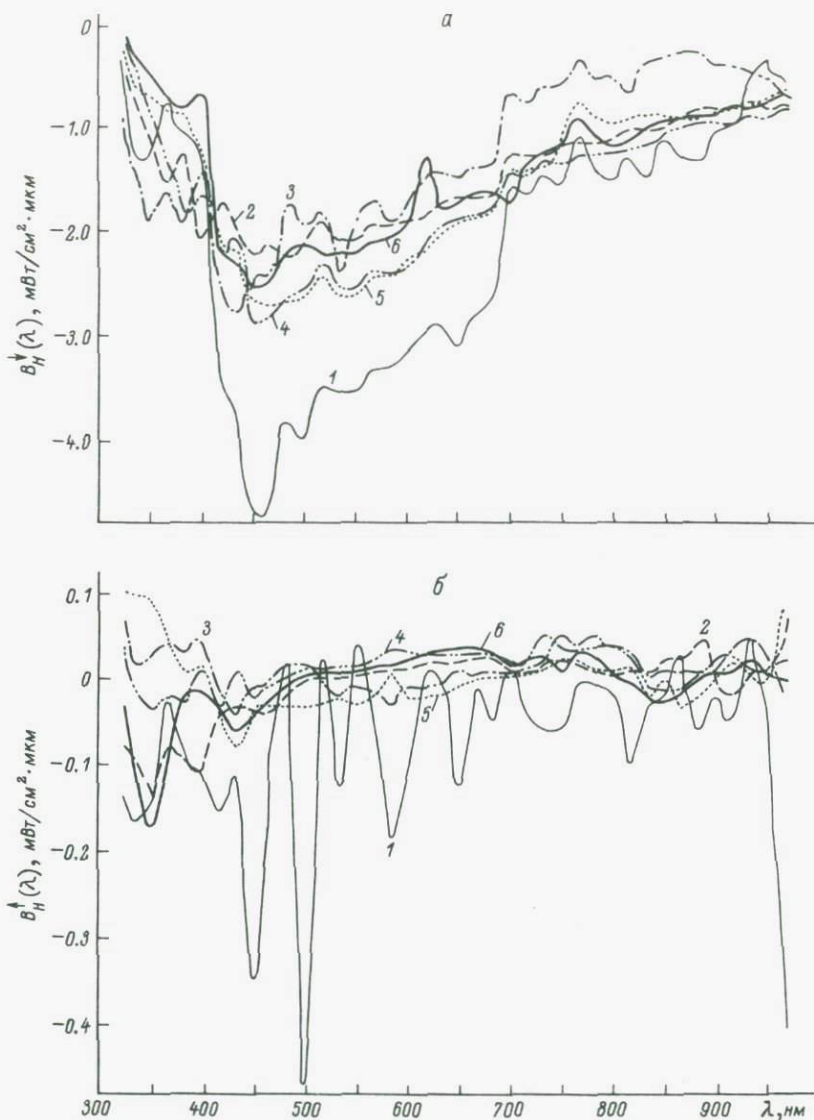
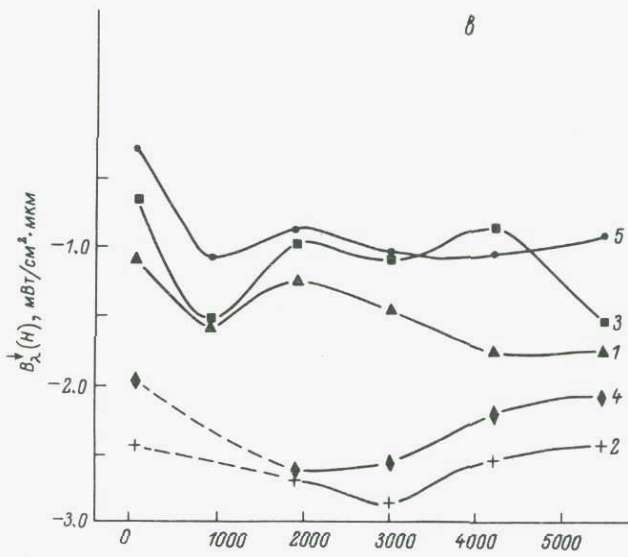


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициентов регрессии  $B_H^{\downarrow}(\lambda)$  (а, б) и их вертикальные профили  $B_H^{\uparrow}(\lambda)$  (в, г) по наблюдениям 22 мая 1983 г.

а, б;  $H$ , м: 1 - 50, 2 - 900, 3 - 1900, 4 - 3000, 5 - 4200, 6 - 5500.

в, г;  $\lambda$ , нм: 1 - 375, 2 - 451, 3 - 551, 4 - 700, 5 - 850.



2

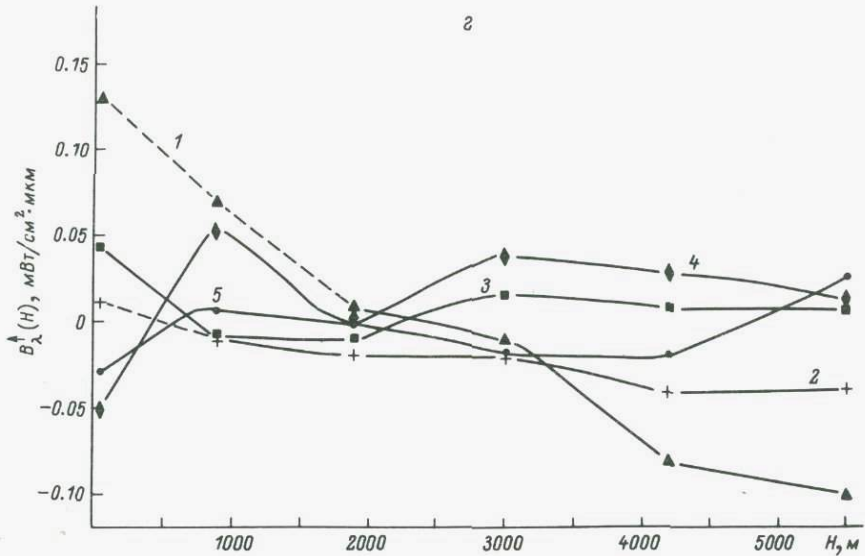


Рис. 1 (продолжение).

Зависимость  $F_{\lambda}^{\downarrow}(p)$  в данном случае целесообразнее всего представлять параболой 2-й степени,

$$F_{\lambda}^{\downarrow}(p) = F_{0,\lambda}^{\downarrow} + F_{1,\lambda}^{\downarrow} \cdot p + F_{2,\lambda}^{\downarrow} \cdot p^2,$$

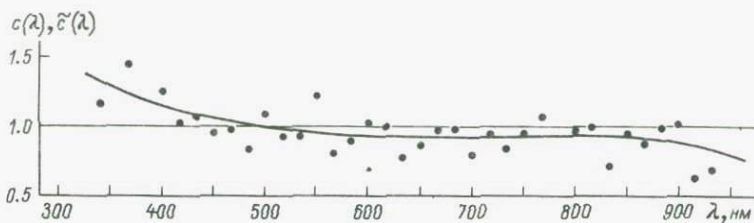


Рис. 2. Корректировочные множители  $c(\lambda)$  (точки) и  $\tilde{c}(\lambda)$  (сплошная кривая) для фотометрической системы СИИС.

либо воспользоваться формулой Буге:

$$\ln F_p^\downarrow = \ln F_0 - \tau \cdot p.$$

По МНК определяется только значение  $F_{0,\lambda}^\downarrow$  как  $F_\lambda^\downarrow(p)$ , экстраполированное на уровень  $p=0$ .

Отношение

$$\frac{S_{0,\lambda} \cdot \cos \psi_0}{F_{0,\lambda}^\downarrow} = c(\lambda),$$

где  $S_{0,\lambda}$ , так называемое спектральное распределение солнечной постоянной, дает поправочный множитель для исправления фотометрической системы и приведения ее к принятым значениям солнечной постоянной.

Как правило, значения  $c(\lambda)$  осциллируют при изменении длины волны  $\lambda$ , поэтому их приходится сглаживать тем или иным оператором с последующим вычислением  $\tilde{c}(\lambda)$  (рис. 2). Исправлению, т.е. умножению на  $\tilde{c}(\lambda)$ , подвергаются как падающий, так и восходящий потоки. Значения  $S_0(\lambda)$ ,  $F_0^\downarrow(\lambda)$ ,  $c(\lambda)$ ,  $\tilde{c}(\lambda)$  и все исправленные потоки выводятся на печать.

Полученные таким образом значения потоков  $F_{\lambda,H}^\downarrow$  и  $F_{\lambda,H}^\uparrow$  будут в дальнейшем использоваться для расчета различных атмосферных радиационных характеристик, как правило сглаженных. Сглаживанием данных уничтожается влияние случайных погрешностей и подчеркиваются существующие физические закономерности.

При сглаживании потоков использовались разные алгоритмы (основанные на „сплайн“-технике, операторе Уиттекера, использующие полиномиальное представление, разложение в ряд Фурье, средневзвешенные значения по нескольким точкам и др.), но все они не давали удовлетворительных результатов, приводили к осциллирующим значениям потока. Однако  $F_{\lambda,H}^{\uparrow\uparrow}$  не могут осциллировать, ибо величина потока с уменьшением высоты в атмосфере должна уменьшаться монотонно (в данном участке спектра — 350–950 нм — в рассматриваемом слое земной атмосферы нет источников излучения). Поэтому был выбран метод сглаживания скользящей линейной ап-

проксимацией (метод СЛА) с последовательным уменьшением числа точек, по которым рассчитываются прямые от  $n = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1, \frac{N}{2} - 2, \dots$ , где  $N$  – число зондировок на „подробном” спуске, до тех пор, пока не произойдет нарушение монотонности сглаженной кривой более чем на погрешность округления сглаженных данных – половину единицы низшего разряда. Если монотонности при  $n = \frac{N}{2}$  достичь не удастся, на печать выдается соответствующее сообщение: „Монотонность не достигнута; плохие данные”, а в таблицах перед длинной волной такого ряда ставится знак „-”. Пример сглаживания потоков по наблюдениям 22 мая 1983 г. показан на рис. 3, а, б. Результаты сглаживания потоков печатаются в виде таблиц и графиков для некоторого набора длин волн.

Логарифмическая производная от потоков

$$\alpha_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H) = \frac{1}{F_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)} \cdot \frac{\partial F_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)}{\partial H}$$

рассчитывается по несглаженным данным по формулам, дающим сразу сглаженные значения (Ланцош, 1961):

$$\alpha_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H) = \frac{\sum_{m=-k}^{+k} m \cdot F_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H + m \cdot \Delta H)}{2 \cdot F_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H) \cdot \sum_{m=1}^k m^2 \cdot \Delta H},$$

где  $k = 28, 27, \dots$  уменьшается до тех пор, пока не появятся отрицательные значения  $\alpha_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)$ , при этом происходит возврат к предшествующему значению  $k$  (у монотонной функции производная не меняет знак). Можно использовать также и последовательность возрастающих  $k$  до тех пор, пока не исчезнут отрицательные значения  $\alpha_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)$ . На печать выводятся таблицы производной  $\alpha_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)$  для „подробного” спуска.

Значения альбедо

$$A_{\lambda}(H) = \frac{F_{\lambda}^{\uparrow}(H)}{F_{\lambda}^{\downarrow}(H)} \cdot 100\%$$

и балансов

$$B_{\lambda}(H) = F_{\lambda}^{\downarrow}(H) - F_{\lambda}^{\uparrow}(H)$$

сглаживаются тем же методом, что и значения потоков  $F_{\lambda}^{\uparrow\downarrow}(H)$ , т.е. методом СЛА. На печать выводятся как несглаженные, так и сглаженные значения соответствующих величин для „подробного” спуска и графики  $A_{\lambda}(H)$ ,  $\tilde{A}_{\lambda}(H)$  и  $B_{\lambda}(H)$ ,  $\tilde{B}_{\lambda}(H)$  для некото-

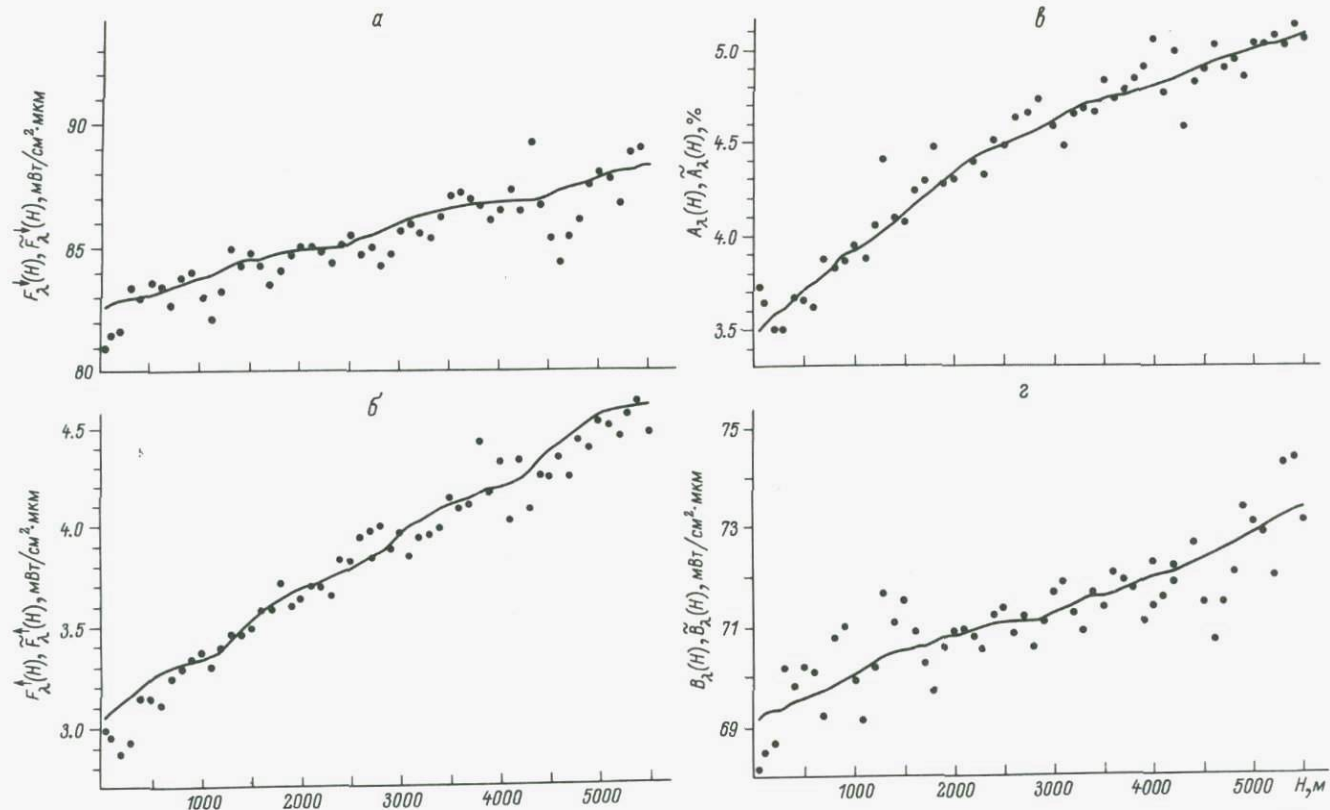


Рис. 3. Несглаженные и сглаженные значения нисходящих (а) и восходящих (б) спектральных потоков излучения в атмосфере, несглаженные и сглаженные значения спектрального альбеда (в) и спектрального баланса (г) над Ладожским озером 22 мая 1983 г.,  $\lambda = 700$  нм.

рого набора длин волн. В качестве примера действия оператора сглаживания приведен рис. 3, в, г для данных, полученных 22 мая 1983 г.

Абсолютные и относительные лучистые притоки во всем слое атмосферы от  $H_{\max}$  до  $H_{\min}$  рассчитываются по сглаженным значениям баланса:

$$b_{\lambda}(H_{\max}, H_{\min}) = \frac{\tilde{B}_{\lambda}(H_{\max}) - \tilde{B}_{\lambda}(H_{\min})}{p_{\max} - p_{\min}},$$

$$\beta_{\lambda}(H_{\max}, H_{\min}) = \frac{b_{\lambda}(H_{\max}, H_{\min})}{\tilde{F}_{\lambda}^{\dagger}(H_{\max})} \cdot 100\%.$$

Результаты расчетов представляются в виде таблиц и графиков.

Абсолютные и относительные лучистые притоки в 100-миллибарных (или 1000-метровых) слоях рассчитываются так же. Однако подобные вычисления производятся только для наблюдений, где  $\beta_{\lambda} \geq 5-10\%$ , либо для наблюдений в полосах молекулярного поглощения, где во всем слое атмосферы  $\beta_{\lambda} \geq 20\%$ .

Значения абсолютных и относительных притоков, очевидно, сглаживанию не подлежат, так как полностью отсутствует какая-либо априорная информация, позволяющая контролировать процесс статистической обработки.

### 3. О погрешностях измерений $F_{\lambda}^{\dagger}$ и вычислений $A_{\lambda}, B_{\lambda}, b_{\lambda}, \beta_{\lambda}$

Одна из основных задач измерения падающих и восходящих потоков — вычисление спектральных лучистых притоков тепла на разных уровнях земной атмосферы. Большая трудность их получения заключается в том, что лучистые притоки тепла являются вторыми разностями измеряемых потоков излучения, поэтому их абсолютная погрешность обычно в 2 раза больше абсолютной погрешности измерения потоков, и, следовательно, в том случае, если сами притоки малы, например более чем на порядок меньше потоков, то при погрешности измерения потоков  $\sim 1-2\%$  мы будем иметь погрешность притока, по абсолютной величине сравнимую со значением самой характеристики.

Анализ реально получаемых данных показывает, что в условиях проведения эксперимента с борта самолета-лаборатории относительная погрешность определения  $F_{\lambda}^{\dagger}(H)$  и  $F_{\lambda}^{\uparrow}(H)$  составляет около 1.2%, а относительная погрешность  $A_{\lambda}(H)$  и  $B_{\lambda}(H)$  1.5%. Оценка погрешности  $F_{\lambda}^{\dagger}(H)$  производится по среднеквадратическому отклонению наблюдаемых значений во время „подробного“ спуска от

сглаженных по описанной выше методике. В этом случае погрешность абсолютного спектрального лучистого притока (по отношению к падающему потоку) составит около 2%. Если относительный спектральный лучистый приток того же порядка (в сравнительно чистых северных воздушных массах), то его погрешность, очевидно, будет около 100%, т.е. одного порядка с измеряемой величиной, а следовательно, определение спектральных лучистых притоков в чистых воздушных массах с помощью ранее применявшейся методики невозможно (что неоднократно отмечалось в наших публикациях). Приемлемая погрешность для условий наблюдений в пустынных районах оценивалась нами в 20–30%, где относительный лучистый приток составляет 5–10% падающего потока.

Очевидно, что никакие усовершенствования аппаратуры в условиях работы на борту самолета-лаборатории, где основные погрешности измерений определяются „болтанкой“, „рысканием“ самолета и другими внешними факторами, не смогут повысить точность измерений. Так как указанные выше погрешности являются случайными, то заметного уменьшения погрешности измерений можно достигнуть лишь в результате выполнения избыточных измерений с дальнейшей статистической обработкой полученных данных.

Возможность выполнения избыточных измерений появилась в последние годы с введением автоматического подбора коэффициентов усиления, магнитной записи результатов измерений и первичной обработки их на ЭВМ. Измерения на последнем спуске (около местного полудня) через каждые 100 м осуществлялись именно для получения избыточных данных, которые в дальнейшем сглаживались по той или иной методике с уменьшением погрешности сглаженного значения в 3–5 раз. Таким образом, даже для весьма малых относительных притоков в чистых воздушных массах (~2% над акваториями Ладожского и других озер) относительная погрешность вычисления  $b_{\lambda}$  будет уменьшена до ~20–30%, т.е. при использовании этой методики измерения спектральных лучистых притоков в указанных условиях оказались возможными. При исследовании лучистого притока в запыленных (пустынных) воздушных массах, по видимому, возможно и получение с приемлемой точностью вертикальных профилей указанных характеристик.

#### 4. Спектральные потоки, альbedo и балансы над акваторией Ладожского озера 22 мая 1983 г.

Описанная методика была применена при обработке результатов наблюдений потоков  $F_{\lambda, H}^{\downarrow}$  и  $F_{\lambda, H}^{\uparrow}$  над Ладожским озером. Как уже отмечалось, отработка методики производилась на серии измерений, выполненных 22 мая 1983 г. с 10<sup>h</sup> 03<sup>m</sup> до 14<sup>h</sup> 56<sup>m</sup>. Исходный массив данных содержал результаты измерений – на спуске и подъеме на уровнях через 100 мб и через 100 м – при спуске с 5500 до 50 м около местного полудня, в 13<sup>h</sup> 49<sup>m</sup>.

Результаты измерений падающих и восходящих спектральных потоков излучения и вычисленных спектральных альbedo и баланса могут быть представлены либо в виде спектральных зависимостей  $F_H^{\uparrow}(\lambda)$ ,  $A_H(\lambda)$  и  $B_H(\lambda)$  на фиксированных уровнях  $H$  в атмосфере, либо в виде вертикальных профилей  $F_{\lambda}^{\uparrow}(p)$ ,  $A_{\lambda}(p)$  и  $B_{\lambda}(p)$  для выбранного набора длин волн. Первые зависимости, очевидно, характеризуют спектральный ход изучаемых величин, вторые — их пространственную структуру в земной атмосфере.

На рис. 4, а-г представлены спектральные зависимости  $\tilde{F}_H^{\uparrow}(\lambda)$ ,  $\tilde{A}_H(\lambda)$  и  $\tilde{B}_H(\lambda)$  для уровней атмосферы ( $H$ ) 50, 900, 1900, 3000, 4200 и 5500 м над уровнем моря, приведенные к минимальному зенитному расстоянию Солнца. На рис. 4, а видно, что спектральные потоки нисходящей радиации убывают с уменьшением высоты во всем диапазоне длин волн. В сине-фиолетовой части спектра убывание наиболее заметно. Максимум спектральной кривой не меняет положения при переходе к нижним уровням тропосферы. Слабо выраженные полосы кислорода (0,69, 0,76 мкм) и практически отсутствующие на больших высотах полосы водяного пара (0,72, 0,82 мкм) усиливаются с уменьшением высоты.

На рис. 4, б показаны кривые распределения энергии в спектрах восходящей радиации, полученные на тех же уровнях атмосферы и при тех же условиях. На рисунке видно, что абсолютная величина и спектральный состав восходящих потоков значительно изменяются с уменьшением высоты, полосы же поглощения в спектре восходящей радиации с увеличением высоты углубляются.

На рис. 5, а и б показаны вертикальные профили падающих и восходящих спектральных потоков излучения в „непрерывном спектре“ и в полосах поглощения атмосферных газов:  $O_2 - \lambda = 762$  нм и  $H_2O - \lambda = 934$  нм. Если в непрерывном спектре процесс переноса излучения близок к консервативному, кривые  $F^{\downarrow}(\lambda)$  и  $F^{\uparrow}(\lambda)$ , соответствующие одной длине волны, идут почти параллельно, то в полосах поглощения о консервативности переноса излучения не может быть и речи — отмеченные кривые с увеличением высоты значительно расходятся.

Спектральное альbedo системы „поверхность-атмосфера“ (рис. 4, в) по мере подъема в тропосфере вне полос поглощения растет тем больше, чем короче длина волны. Минимумы наблюдаются на длинах волн, соответствующих полосам поглощения  $O_2$  и  $H_2O$ . Различие спектральных альbedo на разных уровнях атмосферы отражает действие так называемого спектрального передаточного оператора атмосферы для альbedo. Вертикальные профили альbedo (рис. 5, в) иллюстрируют рост альbedo системы с увеличением высоты тем большим, чем короче длина волны.

На рис. 4, г показан спектральный ход радиационного баланса на разных уровнях тропосферы. Так как при вычислении радиационного баланса определяющим является  $F_H^{\downarrow}(\lambda)$ , то спектральный ход кривых баланса  $B_H(\lambda)$  во многом повторяет спектральный ход  $F_H^{\downarrow}(\lambda)$ . Однако изменения  $B_H(\lambda)$  с высотой значительно меньше. Эти изменения определяются наличием лучистого притока тепла

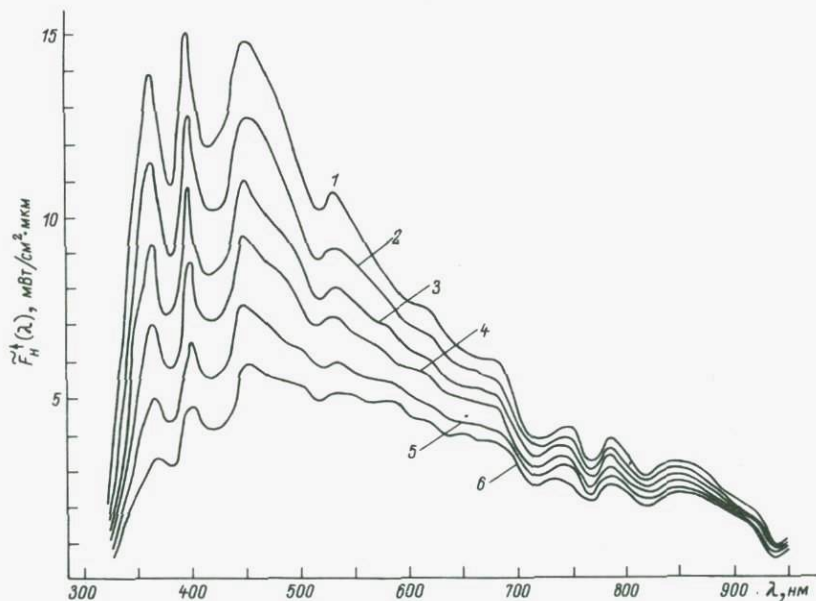
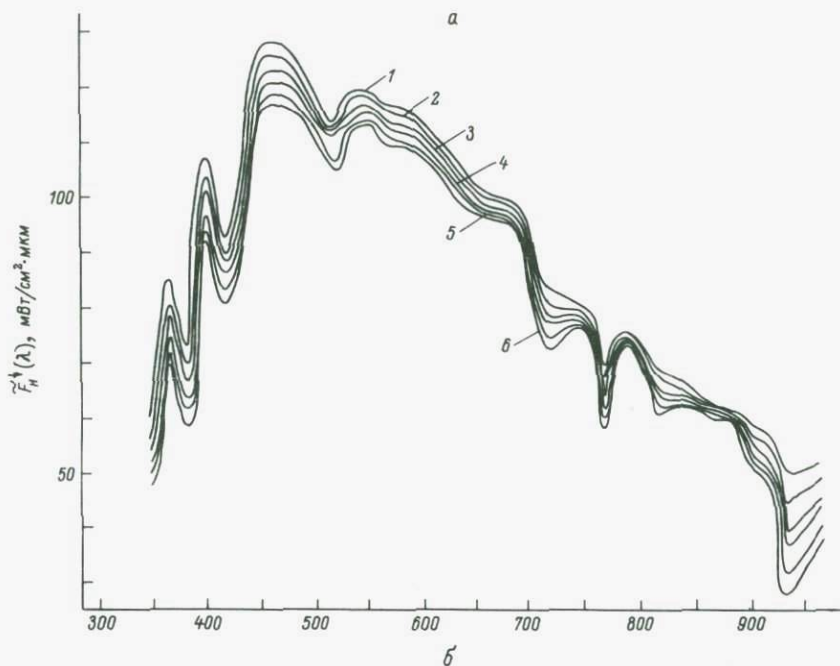


Рис. 4. Спектральные зависимости нисходящих (а) и восходящих (б) потоков излучения в атмосфере, альbedo (в) и баланса лучистой энергии (г) на разных уровнях атмосферы над Ладожским озером 22 мая 1983 г.

$H$ , м: 1 - 5500, 2 - 4200, 3 - 3000, 4 - 1900, 5 - 900, 6 - 50.

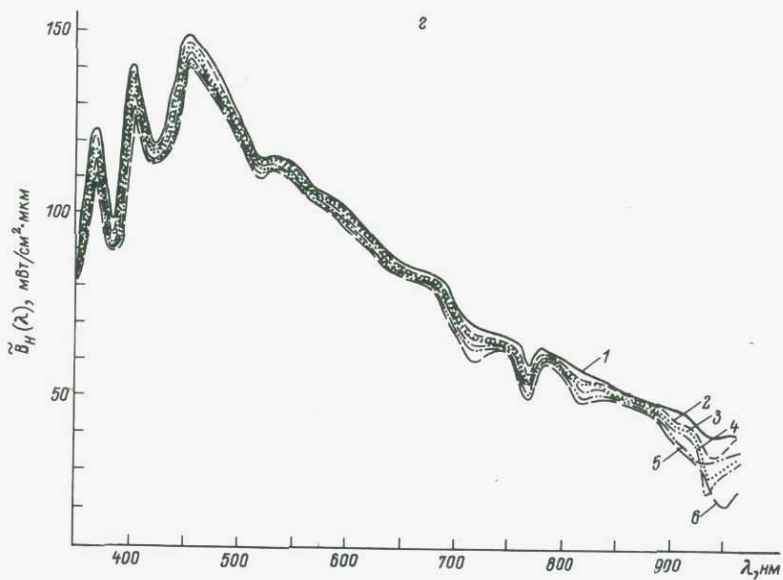
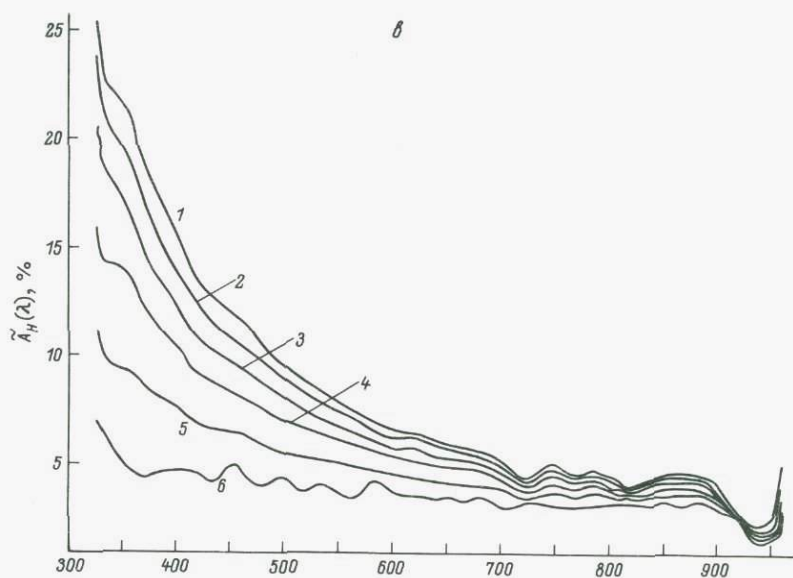


Рис. 4 (продолжение).

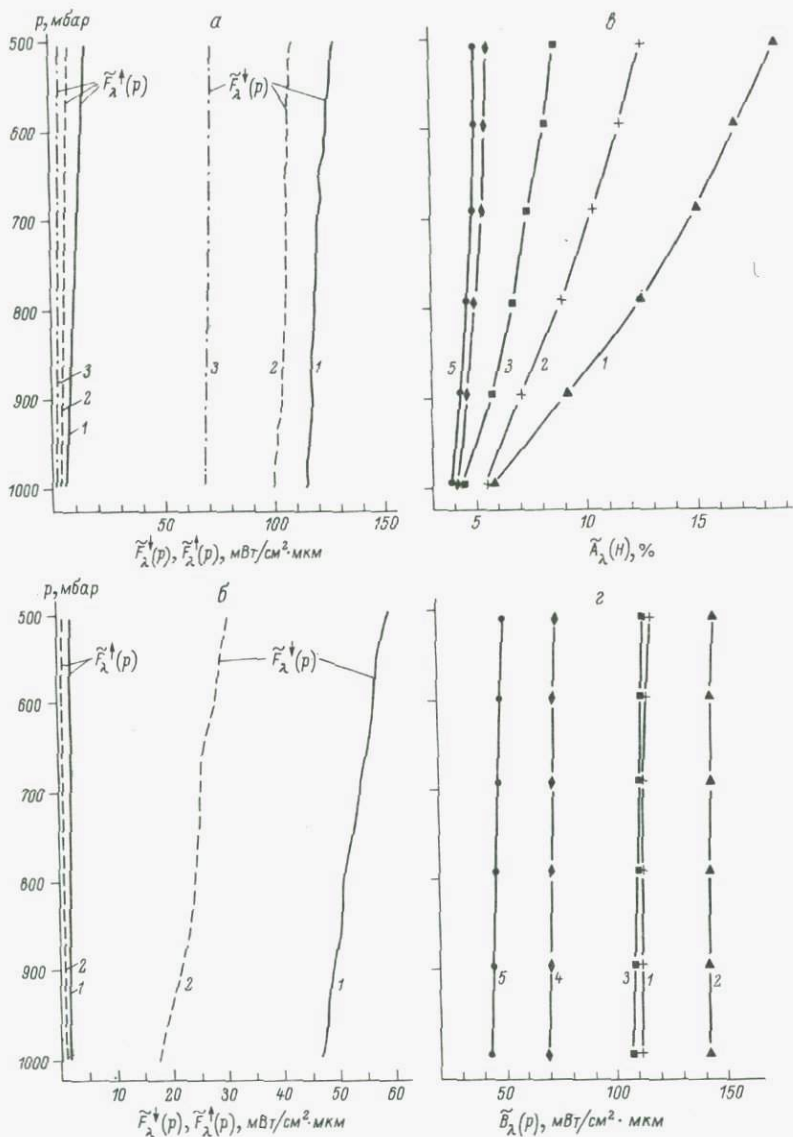


Рис. 5. Вертикальные профили нисходящих и восходящих спектральных потоков излучения в выбранных длинах волн в непрерывном спектре (а) и в полосах поглощения атмосферных газов (б), спектрального альbedo (в) и спектральных балансов (г) над Ладожским озером 22 мая 1983 г.

$\lambda$ , нм, а: 1 - 451, 2 - 600, 3 - 800, б: 1 - 762 ( $\text{O}_2$ ), 2 - 934 ( $\text{H}_2\text{O}$ ), в, г: 1 - 375, 2 - 451, 3 - 551, 4 - 700, 5 - 850.

в атмосферу, а так как при работе в чистых воздушных массах над акваторией Ладожского озера он мал, то и различия в кривых малы. На вертикальных профилях  $B_{\lambda}(p)$  (рис. 5, г) все кривые  $B_{\lambda}(p)$  для участков „непрерывного спектра“ идут практически параллельно оси ординат. Это еще раз подтверждает вывод о том, что в чистых воздушных массах процесс переноса излучения близок к консервативному.

#### 5. Спектральные лучистые притоки тепла над акваторией Ладожского озера 22 мая 1983 г.

Основной и конечной целью измерения спектральных падающих и восходящих потоков солнечного излучения является расчет спектральных лучистых притоков тепла в земной атмосфере. Потолок полета самолета-лаборатории был около 5,6 км (т.е. порядка 500 мб). Это позволяет определить указанные характеристики лишь в нижней части тропосферы. Однако это именно та часть земной атмосферы, где в основном формируются те явления, которые определяют погоду и климат.

На рис. 6, а показаны абсолютный и относительный спектральные притоки лучистой энергии во всем зондируемом слое атмосферы от 50 до 5500 м над уровнем моря, отнесенные к 1 бару.

На участке спектра от ~450 до ~750 нм штрихпунктирной линией показан предполагаемый ход спектрального лучистого притока тепла только для аэрозоля (за вычетом поглощения озоном в полосе Шапью). Он близок к нейтральному, но имеет некоторое повышение в коротковолновой части спектра, что характерно для „красного“ аэрозоля (для наблюдений по программе „КЭНЭКС-70“ имели  $b(\lambda) \sim \lambda^{-1}$ ). Следует, однако, отметить, что как сама величина спектрального лучистого притока на длинах волн, где он имеет минимальные значения, так и указанная выше тенденция сопоставимы с погрешностями измерений  $b_{\lambda}(H_{min}, H_{max})$ .

В ультрафиолетовой области спектра наблюдаются относительные лучистые притоки тепла до ~15%. Ввиду увеличения поглощательной способности озона с уменьшением длины волны, казалось бы, должен увеличиваться и лучистый приток тепла. Однако на длинах волн  $\leq 350$  нм лучистый приток тепла в атмосфере уменьшается до нуля. Это нетрудно объяснить тем, что в этом участке спектра на уровень 5600 м в атмосфере и ниже солнечная радиация практически не доходит из-за полного поглощения ее озоном на больших высотах.

В чистой воздушной массе, наблюдавшейся 22 мая 1983 г. над Ладожским озером, в интервале длин волн от ~400 нм до ~550 нм, имел место практически нейтральный лучистый приток ~1-2%, видимому обусловленный поглощением ядрами частичек, окруженных водной оболочкой — типичным аэрозолем, появляющимся в атмосфере высоких широт с достаточно высокой относительной влажностью. На участке от ~550 до ~650 нм четко выделялось поглощение озоном в полосе Шапью: относительный лучистый приток возрастает здесь до 5%. Наблюдавшиеся в интервале длин волн  $\lambda = 430-670$  нм

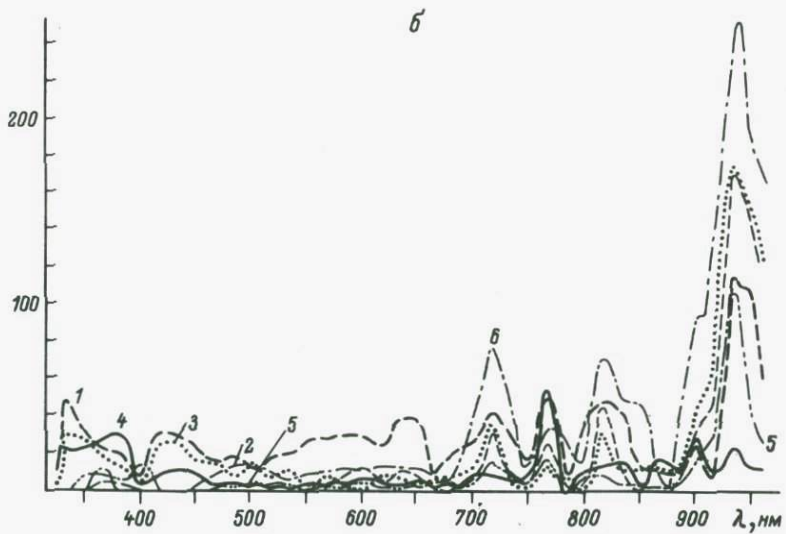
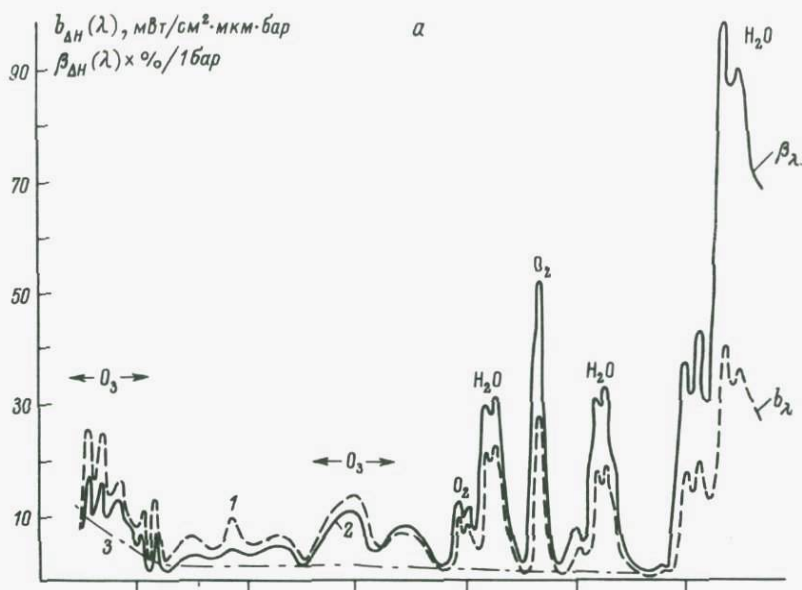


Рис. 6. Абсолютный  $b_{\lambda}$  и относительный  $\beta_{\lambda}$  спектральный лучистый приток тепла в слое атмосферы 50-5500 м (а) и относительный приток тепла  $\beta_{\Delta H}(\lambda)$  в слоях толщиной  $\Delta H=1000$  м (б).  
 а: 1 -  $b_{\lambda}$ , 2 -  $\beta_{\lambda}$ , 3 -  $\beta_{\lambda}$  после учета поглощения  $O_2, O_3, H_2O$ .  
 б,  $\Delta H$ , м: 1 - 5500-4500, 2 - 4500-3500, 3 - 3500-2500, 4 - 2500-1500, 5 - 1500-500, 6 - 500-50.

осцилляции величин спектрального лучистого притока тепла, по-видимому, обусловлены лишь погрешностями измерений. На этом участке спектра на рис. 6, а сплошной линией показана сглаженная кривая относительного спектрального лучистого притока тепла (отклонения несглаженных значений от сглаженных находятся в пределах погрешностей, оцененных в первой части настоящей работы). В ИК-участке спектра ( $\lambda \geq 650$  нм) наблюдались весьма высокие значения относительных спектральных притоков (20–50%), соответствующие полосам поглощения атмосферных газов.

В промежутках между указанными полосами поглощения атмосферных газов относительный спектральный лучистый приток составлял около 1%, т.е. имел почти то же значение, что и на  $\lambda = 400$ –550 нм.

Учитывая оцененную выше погрешность определения спектральных лучистых притоков тепла, вычисление вертикального профиля спектрального лучистого притока тепла, обусловленного поглощением аэрозолем в наблюдавшейся чистой воздушной массе, следует считать невозможным. В данном случае возможен лишь расчет вертикальных профилей относительных спектральных лучистых притоков лишь в молекулярных полосах поглощения атмосферных газов.

На рис. 6, б показан относительный спектральный лучистый приток тепла в километровых (нижнем – полукилометровом) слоях, также отнесенный к 1 бару (реальные значения величин по оси ординат приблизительно в 10 раз меньше). Прежде всего следует обратить внимание на разброс максимальных значений спектральных относительных лучистых притоков тепла в полосе поглощения кислорода у  $\lambda = 760$  нм. Ввиду того что кислород в тропосфере перемешан и его вертикальное распределение подчиняется барометрическому закону, наблюдаемый разброс указанных значений является здесь случайным. Он примерно лишь в 2 раза меньше величины максимального притока, которая в среднем здесь порядка 2,5%. Согласно приведенным выше оценкам, погрешность определения спектрального лучистого притока в этом случае должна быть около 0,5–1%, что по порядку величин согласуется с тем, что изображено на рис. 6, б.

Очевидно, что о различиях в спектральных лучистых притоках в рассматриваемых слоях в „непрерывном спектре“ и в полосе Шапюи не приходится говорить – они меньше возможных погрешностей измерений. Анализ различий в относительных спектральных лучистых притоках тепла в полосе поглощения воды „рбс“ на  $\lambda = 935$  нм показывает, что 22 мая 1983 г. максимальное содержание водяного пара было в приземном слое (50–500 м), на высоте 1 км несколько ниже, далее на высоте около 2 км существенно снижалось и вновь повышалось на высоте 4–5 км. Примерно такие же особенности видны и в полосе поглощения водяного пара  $\alpha$  ( $\lambda = 0,72$  мкм) и в полосе на  $\lambda = 0,8$  мкм. Следует отметить, что эти выводы желательнее сравнить с данными аэрологического зондирования атмосферы на близлежащих ГМС.

В заключение подчеркнем основные выводы, полученные в результате проведенных исследований.

1. Разработана методика наблюдений (на основе СИИС НИИФ ЛГУ), позволяющая в несколько раз повысить точность определения спектральных лучистых потоков тепла в свободной атмосфере — приблизительно до 0,5% относительно величины падающего спектрального потока излучения.

2. Применение описанной в работе методики наблюдений и обработки измерений позволяет оценить спектральные лучистые потоки тепла в относительно чистых воздушных массах северных районов (в том числе над акваториями больших озер северо-западной части ЕТС), которые составляют порядка 1–2% относительно падающего спектрального потока солнечного излучения.

3. Исследованы  $F_H^{\uparrow}(\lambda)$ ,  $A_H(\lambda)$ ,  $B_H(\lambda)$ ,  $b_H(\lambda)$  и  $\beta_H(\lambda)$  и построены их вертикальные профили до высоты 5,6 км над акваторией Ладожского озера 22 мая 1983 г.

4. На основании наблюдений, выполненных 22 мая 1983 г. над акваторией Ладожского озера, показано, что в присутствовавшей в тот день чистой воздушной массе содержался аэрозоль с очень слабой поглощательной способностью, около 1–2% относительно падающего потока в 500 мб слое атмосферы.

5. Спектральный ход относительного лучистого потока тепла в атмосфере либо нейтральный, либо соответствует слегка „красному“ аэрозолю (последний эффект сопоставим с погрешностями измерений).

6. На основании выводов 4 и 5 можно предположить либо очень малую концентрацию аэрозоля в день наблюдений, либо заключить, что аэрозольные частички были окружены водной оболочкой, существенно повышающей вероятность „выживания“ кванта при элементарном акте взаимодействия излучения со средой; аэрозоль такого типа весьма характерен для атмосферы северных широт с достаточно высоким содержанием водяного пара.

7. Достигнутое повышение точности измерений  $b_\lambda$  и  $\beta_\lambda$  не позволяет, однако, в чистых, малопоглощающих воздушных массах определять вертикальные профили указанных параметров вне достаточно сильных молекулярных полос поглощения (например  $H_2O$  — рбт и т.д.).

#### Л и т е р а т у р а

Б а л д и н П.Ю., И в л е в Ю.С. Конструкция фотоэлектрического дифракционного коротковолнового спектрометра К-3 (оптико-механические блоки). — Проблемы физики атмосферы, 1976, вып. 13, с. 117–120.

В а с и л ь е в О.Б., Г р и ш е ч к и н В.С., К о в а л е н к о А.П., Т о в с т е н к о И.А., Ш у л ь ц Э.О., К о н д р а т ь е в К.Я. Спектральная информационно-измерительная система для исследования поля коротковолнового излучения в атмосфере с земной поверхности и с самолета. Наст. сб., с. 225–238.

- Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. Аномалии радиационного баланса Земли и теплосодержание деятельного слоя океана как проявления энергоактивных зон. М., 1984. 278 с.
- Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М., 1961. 524 с.
- Радиационные характеристики атмосферы/Под ред. К.Я. Кондратьева. Л., 1969. 403 с.

К.Я. Кондратьев, Э.М. Горелова (ИНОЗ АН СССР),  
В.Ф. Жвалев (ГГО)

### ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ НАД ЛАДОЖСКИМ ОЗЕРОМ ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ И СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Комплексная программа изучения больших озер дистанционными методами включает целый ряд специальных разделов, при этом озеро, его бассейн и атмосфера над ним являются хорошим полигоном для отработки методов комплексного экспериментального исследования взаимодействия водоема и атмосферы. Изучение составляющих радиационного баланса системы поверхность воды—атмосфера — один из самых важных разделов таких исследований, так как поступление солнечной радиации и пределы ее временных колебаний определяют интенсивность многих гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических процессов в озере.

Изучение составляющих радиационного баланса системы поверхность озера—атмосфера было проведено на Ладожском и Онежском озерах Институтом озероведения АН СССР совместно с Главной геофизической обсерваторией и Северо-Западным управлением Госкомгидромета СССР. Целью этих работ являлось решение комплексных задач и отработка методики восстановления составляющих радиационного баланса водной поверхности по данным дистанционных наблюдений по системе судно—самолет—спутник. В экспериментах участвовали экспедиционные суда Института озероведения, самолет-лаборатория ИЛ-18 ГГО и ИЛ-14 СЗУ.

На судне велась непрерывная запись суммарной и отраженной радиации, радиационного баланса в приводном слое атмосферы, измерялась прямая радиация (актинометром, без непрерывной записи), суммарная проникающая радиация путем последовательной записи по горизонтам. Кроме того, на судне и на самолете ИЛ-14 СЗУ был также использован пиранометр, изготовленный в мастерских ЛЭТИ для измерения суммарной и отраженной радиации в коротковолновом диапазоне. В комплекс самолета—лаборатории ИЛ-18 входили актинометрические приборы (пиранометры и пиргеометры), позволявшие измерять в ходе полета самолета полусферические плотности потоков коротковолновой (0,3—3 мкм) и длинноволновой (3—20 мкм) радиации из нижней и верхней полусфер (Сапунов, Лебединов, 1980).

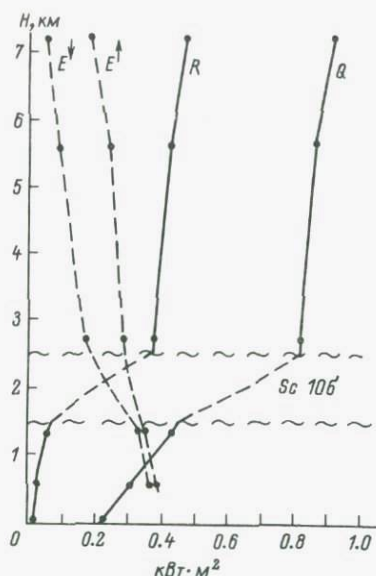


Рис. 1. Профили радиационных потоков.

В наиболее полном объеме эксперимент был осуществлен 1 июня 1983 г. на Ладожском озере с участием экспедиционного судна «Лимнея» Института озероведения и самолета ИЛ-18 ГГО. Судно стояло на якорю в центральной глубоководной части озера (ст. 5-11 по стандартной сетке станций Ладожской экспедиции). Самолет проводил вертикальное зондирование атмосферы на высотах 0,5, 1,3, 2,8, 5,5, 7,2 км, выполняя горизонтальные «площадки» длиной 60-100 км, проходящие над судном. Результаты самолетных измерений приведены в таблице.

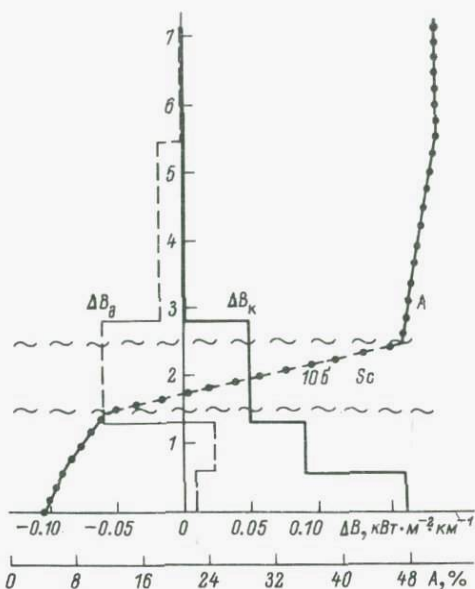
Таким образом, в единый момент времени были получены измерения составляющих радиационного баланса на уровне поверхности воды и на каждом из указанных выше эшелонов полета самолета. В соответствии с методикой приведения самолетных актинометри-

Элементы радиационного баланса ( $Вт/м^2$ ) над поверхностью воды, ст. 5-11, Ладожское озеро

Время	$H$ , м	$Q$	$R$	$E \uparrow$	$E \downarrow$
10 <sup>35</sup>	500	0,239	0,013	0,310	0,346
10 <sup>45</sup>	1350	0,308	0,044	0,301	0,310
11 <sup>07</sup>	2850	0,803	0,382	0,158	0,269
11 <sup>28</sup>	5500	0,821	0,412	0,083	0,233
11 <sup>44</sup>	7200	0,904	0,365	0,058	0,204
12 <sup>35</sup>	500	0,597	0,036	0,263	0,357
12 <sup>50</sup>	500	0,623	0,028	0,264	0,346
13 <sup>04</sup>	500	0,687	0,039	0,263	0,356
13 <sup>15</sup>	500	0,596	0,029	0,261	0,346
13 <sup>25</sup>	500	0,744	0,036	0,249	0,355
13 <sup>45</sup>	1350	0,828	0,048	0,209	0,327
14 <sup>00</sup>	2850	0,789	0,064	0,174	0,288
14 <sup>14</sup>	5500	0,939	0,133	0,097	0,206

Рис. 2. Вертикальные профили составляющих радиационного притока тепла и альbedo.

ческих измерений к единому моменту времени (Кондратьев и др., 1979), разработанной для подобного рода работ, в эксперименте получены вертикальные профили потоков коротковолновой и длинноволновой радиации в атмосфере. Погодные условия во время проведения эксперимента характеризовались наличием переменной облачности 5–10 баллов ( $Sc$ ,  $Cu$ ), что определило характер



вертикальных профилей составляющих радиационного баланса.

На рис. 1 представлены вертикальные профили плотностей потоков радиации в период, близкий к истинному полдню. Наибольший градиент изменения потоков с высотой связан со слоем облачности. Почти вдвое уменьшается поток суммарной радиации под облачным слоем, и в десять раз возрастает поток отраженной радиации под облачным слоем. Приблизительно вдвое уменьшают облака поток падающей длинноволновой радиации и незначительно меняют поток восходящего длинноволнового излучения. Измеренные потоки на уровне зондирования позволяют оценить составляющие радиационного притока тепла в атмосфере (рис. 2). За счет коротковолновой радиации отмечается наибольший приток тепла в нижнем 500-метровом слое над поверхностью воды, который постепенно уменьшается с высотой и на уровнях выше 2,8 км практически отсутствует.

Длинноволновая составляющая притока тепла в вертикальном профиле имеет две особенности. Наибольшие величины выхолаживания дает слой облачности, а подоблачный слой атмосферы за счет длинноволнового обмена незначительно нагревается.

Альbedo системы поверхность воды–атмосфера в подоблачном слое (до высоты 1,3 км) меняется от 4 до 10%. В слое атмосферы над облаками альbedo увеличивается до 48–52%.

Таким образом, совместный судово–самолетный эксперимент по исследованию составляющих радиационного баланса позволяет определить особенности их вертикальных профилей, что дает возможность в дальнейшем при соответствующей систематической обеспеченности измерений оценить влияние различных метеорологических условий и других факторов при расчете элементов радиационного баланса по-

верхности озера на основании данных, измеренных при дистанционном зондировании.

#### Л и т е р а т у р а

- К ондр а т ь е в К.Я., Ж в а л е в В.Ф., П р о к о ф ь е в М.А., Т е р-М а р к а р я н ц Н.Е. Влияние аэрозоля на радиационную энергетику атмосферы. - Тр. ГГО, 1979, вып. 415, с. 3-7.
- С а п у н о в Г.Г., Л е б е д и н о в В.Г. Методика измерений интегральных потоков длинноволновой и коротковолновой радиации с самолета. - Тр. ГГО, 1980, вып. 434, с. 92-96.

К.Я. Кондратьев, В.П. Власов (ИНОЗ АН СССР),  
О.Б. Васильев, В.С. Гришечкин, К.В. Небольсин (НИИФ ЛГУ)

#### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА (НА ПРИМЕРЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И БЕЛОГО МОРЯ)

Дистанционные методы находят все более широкое применение в изучении ледяного покрова морей и внутренних водоемов суши. Использование многозональной аэрокосмической информации для оценки динамики льдов в морях и крупных озерах стало практически традиционным (Временные методические рекомендации ..., 1978; Прокачева и др., 1982; Назиров, 1982, и др.).

Перспективным направлением изучения ледяного покрова являются методы радиотеплолокации. Теоретические исследования излучательных характеристик ледяного покрова (Богородский и др., 1977; Gloersen et al., 1973), выявившие принципиальную возможность определения параметров льда по его радиотепловому излучению, подтверждены экспериментальными данными микроволновых самолетных и спутниковых измерений (Рабинович, Мелентьев, 1970; Рабинович и др., 1970; Курская и др., 1968; Никитин, 1980), с помощью которых восстановлены такие характеристики морского льда, как его сплоченность, возраст и толщина, наличие снежного покрова на его поверхности. Возможности радиотеплолокации для диагностики озерных льдов рассмотрены в статье К.Я. Кондратьева, В.П. Власова и В.В. Мелентьева в настоящем сборнике (с. 217–224). Нельзя не отметить метод подповерхностной радиолокации, который применяется для определения толщины ледяного покрова (Финкельштейн и др., 1984).

В последние годы получило развитие новое важное направление дистанционного зондирования – радиолокационные боковые обзоры, которые позволяют определять большое число характеристик ледяного покрова независимо от его освещенности и практически при любых метеорологических условиях (Бушуев, 1977; Исследование..., 1983; Бушуев, Быченков, 1985, и др.).

Широкое применение в исследованиях природных объектов находят спектрофотометрические методы. Использование спектральных характеристик поверхностей дает дополнительные сведения о цвете, которые, если речь идет о растительности, почвах и горных породах, значительно увеличивают информацию о состоянии объекта. А что можно сказать о ледяном покрове? Имеет ли он цвет и может ли цвет быть информативной характеристикой? Возможно, что использование данных о спектральных отражательных характеристиках льда

$\lambda$ , нм	Онежское озеро, 22 IV 83				Белое море, 23 IV 83			
	снежный лед (N=7), 15 ч 35 мин		„черный“ лед с полигонами тре- шин (N=6), 15 ч 43 мин		открытая вода (N=4), 11 ч 33 мин		припайный лед (N=6), 11 ч 43 мин	
	1		2		3		4	
	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$
380	0,115	0,005	0,0206	0,0003	0,0463	0,0008	0,276	0,009
450	0,100	0,002	0,0206	0,0004	0,0417	0,0006	0,268	0,011
490	0,095	0,002	0,0201	0,0003	0,0367	0,0004	0,252	0,015
560	0,106	0,003	0,0182	0,0003	0,0293	0,0003	0,234	0,013
630	0,110	0,007	0,0141	0,0002	0,0208	0,0002	0,201	0,009
660	0,103	0,007	0,0126	0,0002	0,0175	0,0007	0,186	0,006
720	0,040	0,003	0,0090	0,0001	0,0117	0,0003	0,192	0,008
850	0,025	0,002	0,0097	0,0002	0,0108	0,0004	0,238	0,015
940	0,015	0,001	0,0113	0,0003	0,0075	0,0003	0,196	0,015
x	0,355	0,003	0,302	0,001	0,292	0,001	0,324	0,001
y	0,343	0,003	0,356	0,002	0,303	0,001	0,324	0,003
z	0,302	0,004	0,342	0,002	0,405	0,001	0,352	0,003

и снега также может расширить круг дистанционно регистрируемых физических параметров льда и снега.

Для выяснения возможностей спектрофотометрических методов дистанционного изучения льдов в апреле 1983 г. были организованы измерения  $R(\lambda)$  — коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) тающего ледяного покрова Онежского озера и Белого моря с целью идентификации различных стадий таяния и разрушения льда. Измерения выполнялись с борта самолета-лаборатории ИЛ-14, оборудованного спектрофотометрами К-3 кафедры физики атмосферы Ленинградского государственного университета им. А.А. Жданова (Балдин, Ивлев, 1976; Овчаренко, Товстенко, 1976), с высоты 200 м в околополуденное время. Регистрировалась спектральная яркость  $B(\lambda)$  отдельных льдин до нескольких сотен метров в длину (время регистрации одной спектрограммы около 7 с, что соответствует пролету самолета ИЛ-14 около 500 м). Проекция щели спектрофотометра на земную поверхность равна примерно  $7 \times 0,6$  м. Очевидно, что поверхность льдины не может быть достаточно однородной, чтобы можно было считать, что спектрограммы льда регистрируются без погрешностей, обусловленных пространственной (горизонтальной) неоднородностью отдельных льдин. Для уменьшения влияния этих неоднородностей на результаты измерений для од-

(до полудня)		Белое море, 23 IV 83 (после полудня)				Река Варзуга, 23 IV 83	
дрейфующий лед (N=4), 12 ч 26 мин		дрейфующий лед (N=4), 13 ч 39 мин		открытая вода с гидро- золями, коричневая (N=8), 14 ч 10 мин		ледяной покров, сплошь покрытый снегом (N=5), 13 ч	
5		6		7		8	
$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	$\Delta_{0,7}R(\lambda)$	$R(\lambda)$	
0,387	0,007	0,133	0,008	0,0433	0,0003	-	
0,327	0,015	0,126	0,010	0,0426	0,0002	0,873	
0,327	0,005	0,139	0,007	0,0446	0,0002	-	
0,224	0,003	0,142	0,011	0,0572	0,0002	(0,88)	
0,229	0,005	0,184	0,006	0,0573	0,0003	-	
0,245	0,005	0,135	0,018	0,0623	0,0003	-	
0,303	0,013	0,114	0,008	0,0522	0,0004	0,880	
0,296	0,026	0,148	0,027	0,0213	0,0001	-	
0,194	0,014	0,161	0,012	0,0153	0,0050	0,785	
0,322	0,002	0,372	0,003	0,378	0,001	-	
0,301	0,005	0,342	0,004	0,363	0,001	-	
0,377	0,005	0,286	0,005	0,259	0,001	-	

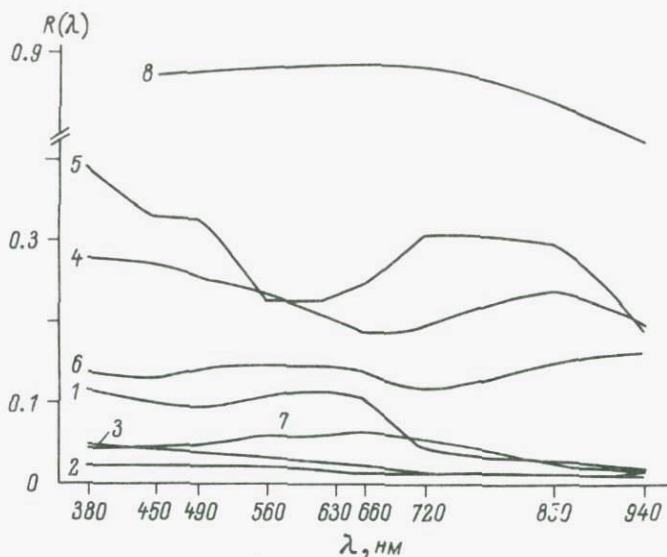
них и тех же льдин записывались спектрограммы при нескольких пролетах самолета с разными курсами. Полученные КСЯ в дальнейшем усреднялись. Кроме того, проводилось усреднение и по длинам волн в пределах 20 нм.

Для нормировки измеряемых спектральных яркостей,  $B(\lambda)$ , т.е. для расчета КСЯ, одновременно с измерением спектральных яркостей льдин регистрировались и спектральные освещенности горизонтальной поверхности (в нашем конкретном случае — падающие спектральные потоки  $F^+(\lambda)$ ). Прибор калибровался по одновременным наземным измерениям  $F_0^+(\lambda)$  и яркости абсолютно белого ортотропного экрана  $B_0(\lambda)$ , которым служила алюминиевая пластина, покрашенная цинковыми белилами и „закопченная“ окисью магния над горящей магниевой стружкой. Вычислялась функция

$$k(\lambda) = \frac{F_0^+(\lambda)}{B_0(\lambda)}, \quad (1)$$

с помощью которой в дальнейшем рассчитывались КСЯ:

$$R(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{F^+(\lambda)} \cdot k(\lambda). \quad (2)$$



Коэффициенты спектральной яркости льдов различного типа.  
Цифры у кривых соответствуют графам таблицы.

В центре видимой области спектра (где при калибровке прибора сигнал оказывался слишком большим) функция  $k(\lambda)$  корректировалась по измерениям КСЯ чистого снега, находившегося на поверхности ледяного покрова р. Варзухи, для которого было принято  $R(\lambda) \approx 0.88$ .

Всего 22 и 23 апреля 1983 г. было зарегистрировано около 30 спектров пяти типов льда на Онежском озере и Белом море и снега на р. Варзухе, а также более 10 спектрограмм воды, чистой и загрязненной гидрозолями. Полученные в результате измерений КСЯ льдов приведены в таблице.

В заголовках граф таблицы указано число спектров  $N$ , использованных для нахождения средних значений КСЯ —  $R(\lambda)$  — и их 70%-ных доверительных интервалов  $\Delta_{0.7} R(\lambda)$ , а наблюдавшиеся водные или ледяные поверхности занумерованы цифрами 1–8. Ниже дается подробное их описание по визуальным наблюдениям бортоператора-гидролога в блистер самолета-лаборатории ИЛ-14.

1. Снежный тающий лед с ровной поверхностью и отдельными несквозными трещинами; общий фон серый.

2. Водно-кристаллический или озерно-водный, „черный“, лед, бесснежный, матовый, с полигонами белых тонких трещин (сухих) размером 15–20 м.

3. Открытая чистая вода.

4. Прилапный лед серо-белого цвета с отдельными более

темными пятнами и узкой поперечной сквозной трещиной; в двух местах полосы желтого песка.

5. Дрейфующий лед серо-белого цвета с отдельными пятнами (2-3 балла) белого (обсохшего) льда.

6. Дрейфующий лед (общий фон его темно-серый), пропитанный водой, с белыми разводами обсохшего льда.

7. Открытая вода с гидрозолями, коричневая.

8. Ледяной покров р. Варзухи, сплошь покрытый снегом; снежный покров чистый, преимущественно ровный, с отдельными надувами, застругами.

Графически полученные данные представлены на рисунке.

Анализ кривых КСЯ показывает, что использованная методика измерений (а именно усреднение КСЯ по набору спектров для одной льдины или для льдин одного типа) позволяет получить кривые  $R(\lambda)$  с приемлемой относительной погрешностью порядка 5-10%. Полученные КСЯ льдов свидетельствуют о том, что их отражательные свойства могут варьировать в очень широких пределах: от очень черных ( $R(\lambda) = 0.01-0.02$ ), более темных, чем чистая вода, до очень светлых ( $R(\lambda) = 0.8-0.9$ ) в случае, если льды покрыты свежевывающим снегом. Различия  $R(\lambda)$  изученных типов льдов оказались статистически значимыми.

Вычисленные цветовые координаты льдов (см. таблицу) показывают, что их цвет статистически значимо отличается от нейтрального ( $x = 0.333$ ,  $y = 0.333$ ,  $z = 0.333$ ), т. е. льды действительно имеют цвет. Цвет льдов (по наблюдениям на Белом море) повторяет цвет чистой воды, из которой он образовался или в которой он плавает. Это может объясняться либо одинаковым в обоих случаях составом гидрозолей и растворенных солей, либо тем, что вода просвечивает сквозь относительно тонкий слой тающего льда, либо просто тающий лед пропитан водой, в которой он плавает. Во всех трех измеренных случаях у льдов цвет менее насыщен, чем у соответствующей воды. Этому может быть ряд причин: при наблюдении тающих льдов выходящее излучение формируется как в толще льдов, так и в толще воды, в которой он плавает; при замерзании воды может происходить самоочистение льда. Два изученных типа льдов на Онежском озере имеют, естественно, цвет, отличный от цвета льдов Белого моря.

В заключение следует отметить, что сформулированные выше выводы являются лишь предварительными. Полученная статистика, к сожалению, еще недостаточна для суждения о том, какие физические свойства льдов могут регистрироваться по измерениям их цвета. Для этого необходимы дальнейшие, более подробные как дистанционные, так одновременно и прямые контактные исследования различных естественных ледяных покровов.

Авторы приносят искреннюю благодарность Михайлову О.Н., Коваленко А.П., Товстенко И.А., Мальцевой Н.И., принимавшим участие в выполнении натуральных измерений и их обработке.

## Л и т е р а т у р а

- Б а л д и н П. Ю., И в л е в Ю. С. Конструкция фотоэлектрического дифракционного коротковолнового спектрофотометра К-3 (оптико-механические блоки). - Проблемы физики атмосферы, 1976, вып. 13, с. 117-120.
- Б о г о р о д с к и й В. В., К о з л о в А. И., Т у ч к о в Л. Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л., 1977. 224 с.
- Б у ш у е в А. В. Аналитическое координирование площадных и маршрутных радиолокационных съемок. - Тр. ААНИИ, 1977, т. 343, с. 46-57.
- Б у ш у е в А. В., Б ы ч е н к о в Ю. Д. Использование радиолокационных снимков ИСЗ „Космос 1500“ для исследования распределения и динамики морских льдов. - Исследование Земли из космоса, 1985, № 3, с. 23-27.
- В р е м е н н ы е м е т о д и ч е с к и е р е к о м е н д а ц и и по использованию спутниковой информации в оперативной практике гидрометслужбы: Оценка ледовой обстановки озер и водохранилищ. Л., 1978. 42 с.
- И с с л е д о в а н и я л е д я н о г о п о к р о в а с п о м о щ ь ю р а д и о л о к а ц и о н н ы х с т а н ц и й б о к о в о г о о б з о р а (РЛС БО): Методическое пособие. Л., 1983. 120 с.
- К у р с к а я Н. А., Ф е д о р о в а Л. В., Я к о в л е в а Г. Д. Тепловое излучение льда в сантиметровом и дециметровом диапазонах. - Тр. ГГО, 1968, вып. 222, с. 54-61.
- Н а з и р о в М. Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры. Л., 1982. 120 с.
- Н и к и т и н П. А. Вариации радиотеплового излучения морских льдов. - Исследование Земли из космоса, 1980, № 5, с. 56-63.
- О в ч а р е н к о В. В., Т о в с т е н к о И. А. Конструкция фотоэлектрического дифракционного коротковолнового спектрофотометра К-3 (электронные блоки). - Проблемы физики атмосферы, 1976, вып. 13, с. 120-124.
- П р о к а ч е в а В. Г., С н и щ е н к о Д. В., У с а ч е в В. Ф. Дистанционные методы гидрологического изучения зоны БАМ. Л., 1982. 224 с.
- Р а б и н о в и ч Ю. И., М е л е н т ь е в В. В. Влияние температуры и солености на изучение гладкой водной поверхности в сантиметровом диапазоне. - Тр. ГГО, 1970, вып. 235, с. 78-123.
- Р а б и н о в и ч Ю. И., Ш у к и н Г. Г., Н о в о с е л о в А. И. Применение радиолокации в ледовой разведке. - Тр. ГГО, 1970, вып. 235, с. 67-71.
- Ф и н к е л ь ш т е й н М. И., Л а з а р е в Э. И., Ч и ж о в А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ. Л., 1984. 118 с.

Gloersen P., Nordberg W., Schmugge T.T. Microwave signatures of first-year and multiyear sea ice. - J. Geophys. Res., 1973, vol. 78, N 18, p. 3564-3572.

К.Я. Кондратьев, В.П. Власов (ИНОЗ АН СССР),  
В.В. Мелентьев (ГГО)

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА, ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПО ЕГО ПОЛЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ ОЗ. СЕВАН)

Выполненные ранее теоретические исследования излучательных характеристик ледяного покрова (Богородский и др., 1977; Gloersen et al., 1973) выявили принципиальную возможность восстановления параметров льда по его радиотепловому излучению. Анализ данных наблюдений подтвердил перспективность использования средств микроволнового дистанционного зондирования для решения этой задачи. Так, в работах Рабиновича с соавторами (Рабинович и др., 1970, 1975) по данным измерений с самолета восстановлена сплоченность морского ледяного покрова, а в ряде других исследований (Курская и др., 1968; Никитин, 1980), основанных на материалах самолетных и спутниковых наблюдений, подтверждена возможность определения таких параметров, как возраст и толщина морского льда, а также распознавание снежного покрова на его поверхности.

Одним из перспективных направлений применения средств теплолокации является использование комплексов сканирующей микроволновой аппаратуры для построения радиоизображений различных подстилающих поверхностей, в том числе ледяного покрова. Для этой цели в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова совместно с Ленинградским политехническим институтом была разработана антенна с электрическим сканированием (фазированная решетка), установленная на борту самолета-лаборатории ГГО ИЛ-18. Эта антенна позволяет производить прием излучения системы Земля-атмосфера как в режиме сканирования, так и при фиксированном угле визирования, который может изменяться в диапазоне  $\pm 50^\circ$  относительно надира. Длина волны принимаемого излучения  $\lambda = 2.1$  см.

В настоящей работе в целях анализа возможностей радио-теплолокации для диагностики озерных (пресноводных) льдов обсуждаются результаты интерпретации данных многоканальных микроволновых измерений, выполненных с борта ИЛ-18 ГГО 7 апреля 1983 г. над ледяным покровом оз. Севан и прилегающей к нему суши, в комплексе с данными прямых наблюдений на поверхности ледяного покрова. Отметим, что помимо названной выше сканирующей аппаратуры в полете использовался трех-

канальный поляризационный микроволновый комплекс дециметрового диапазона (далее обсуждены лишь измерения на длине волны 18 см).

Зимой 1982/83 г. оз. Севан было покрыто сплошным неподвижным ледяным покровом, который, по данным измерений на водомерных постах, образовался неодновременно: вначале в Большом Севане (6-11 января), а затем в Малом (26 января-3 февраля). В первой декаде марта 1983 г., по данным непосредственных измерений экспедиционного отряда Института озераведения АН СССР, толщина льда в Малом Севане составила 26-30 см, в Большом - 40-46 см.

В результате одновременного замерзания в сужении между Большим и Малым Севаном образовалась поперечная гряда торосистости. Торошение (высота около 1 м) отмечалось и в прибрежных районах, где проходила стантовая трещина. На остальной акватории озера, как в Малом, так и в Большом Севане, насколько можно было установить при объезде озера на машине и выходе на лед на снегоходе „Буран“ при выполнении полуразрезов, верхняя поверхность ледяного покрова была ровной, без заметного торошения, с редкими трещинами, что во многом объяснялось сплошным снежным покровом, ослаблявшим воздействие на лед резких колебаний температуры воздуха. Снежный покров залегал на льду сравнительно равномерно и был однороден по своей плотности (0,20-0,30 г/см<sup>3</sup>). Однако более раннее замерзание Большого Севана обусловило не только намерзание в нем большей толщины льда, но и залегание большей высоты снега. Преобладающая высота снега в Большом Севане приходилась на интервал 15-18 см, в то время как в Малом - на интервал 9-12 см.

Лед на Малом и Большом Севане по всей толщине был водно-кристаллическим (намерзание происходило снизу за счет температурного фактора), чистым, без включения примесей, прозрачным (на основании просмотра кернов льда, полученных с помощью кругового ледового бура). Отмечалось некоторое уменьшение толщины льда в прибрежных районах, что, возможно, объясняется влиянием выходов родниковых вод, которые заметнее проявляются в прибрежной зоне. Выходы родниковых вод приводят к образованию полыней и промоин от одного до нескольких метров, а иногда до 100 м и более в поперечнике, что является своеобразной особенностью ледового режима оз. Севан. Большая полынья размером до 300 м наблюдалась юго-восточнее сужения между Малым и Большим Севаном у северного его берега. Размеры полыньи постепенно увеличивались и, по-видимому, ее влияние сказалось в последующем на более интенсивном таянии ледяного покрова в этой части озера.

Описанная предыстория формирования ледяного покрова предопределила неодинаковые условия его весеннего таяния и разрушения. Снежный покров сошел со льда вначале у северных берегов озера (15-20 марта). В конце марта произошло полное

таяние снега на ледяном покрове, после чего лед непосредственно подвергался воздействию солнечной радиации, что привело к изменению его структуры и потере прочности с образованием трещин и развоидий. Наблюдавшееся с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 7 апреля 1983 г. состояние ледяного покрова было сопоставлено с данными наблюдений на водомерных постах. Полет был выполнен на высоте 4800 м над уровнем моря (2900 м над уровнем озера), а измерения произведены вблизи нижней кромки высокослойистой разорванной облачности 7-8 баллов (в таких условиях наблюдения в оптическом диапазоне были бы невозможны). Сложная метеорологическая обстановка для полета большегрузного самолета в условиях высокогорья при малой горизонтальной видимости не позволила выполнить зондирование атмосферы над озером. Программа летного эксперимента состояла в проведении облетов озера по его периметру и диагональных проходов через Большой и Малый Севан с курсами около  $300^\circ$  и обратно, т. е. по продольной оси озера.

Ниже приведены результаты наблюдений во время одного из проходов при фиксированном угле визирования ( $\lambda = 2.1$  см,  $\theta = 0^\circ$ , надир), а на рис. 1 изображена пространственная картина распределения льда на рассматриваемом участке.

	Т <sub>я</sub>	Примечание		Т <sub>я</sub>	Примечание
Большой Севан	231.2	12 <sup>h</sup> 18' 00"; поселок	Большой Севан	218.2	
	228.9			216.3	Лед более темного цвета
	230.4			215.1	
	226.2			214.4	Серо-белый лед; Т <sub>я</sub> ; ср = 214,2 К
	229.6	Суша; Т <sub>я</sub> ; ср = 230,5 К		214.4	
	228.9			212.8	
	228.9			212.1	Трещина
	231.2			212.8	
	227.4	Припай		212.1	Трещина
	217.0	Полынья		212.8	
	209.8	Большая полынья		212.1	Трещина
	220.1			212.4	
	220.5			213.6	
	220.9			218.6	
	220.5	Белый лед; Т <sub>я</sub> ; ср = 220,5 К		219.3	Белый лед; Т <sub>я</sub> ; ср = 220,4 К
	219.4			221.2	
	219.7			228.6	
	220.1			222.0	
	220.1			218.9	Трещина
	221.2			215.9	
221.2		212.1	Серо-белый лед; Т <sub>я</sub> ; ср = 214,5 К		
221.2		212.8			
221.2		213.6			
220.5	Белый лед	213.6			
		Малый Севан			

Малый Севан	213.6	
	209.9	Открытая вода
	209.4	Серый лед; $T_{я; ср} = 205.0 \text{ K}$
	206.7	
	204.0	Трещина
	205.6	
208.6	$12^{\text{h}} 25' 30''$	

Как видно из приведенных данных, поле излучения ледяного покрова озера в этот период является достаточно неоднородным. Максимальные значения радиоярких температур ( $T_{я}$ ) соответствуют областям ледяного покрова в крайней юго-восточной части Большого Севана. Лед здесь, по данным аэровизуальных наблюдений, имеет внешне однородную поверхность белого цвета, заметны отдельные следы торошения. Бортаэрологом отмечались в этой области трещины и разводья темного цвета шириной 3–5 м, расположенные под углом к направлению полета. Местоположение этих неоднородностей легко идентифицируется по регистрограмме самопишущего потенциометра. В нижней части рис. 1 такие трещины и разводья отмечены вертикальными штрихами различной длины, характеризующими различную ширину разводий в метрах. Хорошо видна на записи и заприпайная полынья, которая препятствовала выходу наземной группы для обследования состояния ледяного покрова озера в этот период.

Поле льда аналогичной структуры, но меньшей протяженности, отмечается по визуальным наблюдениям и по данным микроволновой съемки на Большом Севане, в той его части, которая примыкает к сужению (проливу), отделяющему Большой Севан от Малого. При пролете надолдом и в этом районе зафиксировано некоторое число трещин, соответствующих понижению радиояркой температуры. Пресноводный весенний лед описанной структуры имеет средние значения радиояркой температуры около 220 K и условно отнесен к категории белого.

Значительную часть Большого Севана 7 апреля 1983 г. занимал ледяной покров, имевший при наблюдении сверху более темный оттенок (рис. 1) и названный серо-белым льдом.<sup>1</sup> В этой части озера фиксировались поперечные и продольные трещины, а также значительное число имеющих черный цвет точечных бочкообразной формы промоин (или полыней) диаметром 3–5 м. Такой же формы участки воды встречались и на белом льду, однако здесь их было больше. По-видимому, причины возникновения промоин такой формы связаны с деятельностью под-

<sup>1</sup> Условные характеристики цвета поверхности пресноводного тающего льда не следует увязывать с пределами толщин, регламентированными „Номенклатурой морских льдов“ (1974).

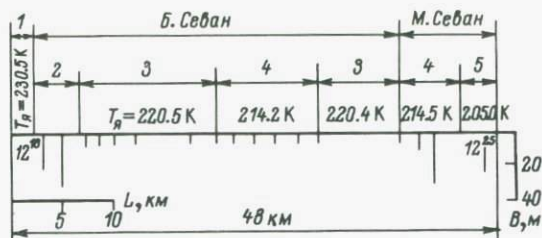


Рис. 1. Вариации  $T_{я}$  7 1У 1983 г. ( $\lambda=2.1$  см,  $\theta=0^\circ$ ).

1 - суша влажная; 2 - припай; 3 - белый лед; 4 - серо-белый лед; 5 - серый лед.

земных ключей, выходы вод которых имеются на дне озера (Сунцев, 1961), что обуславливает в этих местах локальные перемещения более теплой воды к поверхности, приводящие к более быстрому разрушению и таянию ледяного покрова. В целом лед в этой части озера по визуальным оценкам с борта самолета представляется более разрушенным (он кажется более пропитанным водой; к сожалению, взятие проб льда в этот срок оказалось невозможным). Понижение средней радиояростной температуры пресного льда в этой части озера до 214 К косвенно свидетельствует о том же факте. После пересечения большого разводья (рис. 1) полет проходил над Малым Севаном. Лед здесь оказался максимально разрушенным и имел серый цвет различных оттенков. Он был отнесен нами к двум условным градациям: серо-белый и серый лед. Средние значения радиояростных температур ( $T_{я}$ ) для этих льдов равны 214.5 и 205.0 К соответственно.<sup>2</sup>

Отметим, что средние значения  $T_{я}$  для серо-белого льда одинаковы в Большом и Малом Севане. Вблизи берега, по данным микроволнового радиометра, здесь также зафиксирована заприпайная полынья. Контраст излучения на длине волны 2.1 см между белым льдом и поверхностью суши, представляющей собой горы средней степени расчлененности, местами покрытые тающим снежным покровом (до 10%), составил около 10 К при среднем значении  $T_{я}$  для прибрежного района суши равном 230.5 К.

Расчеты по данным измерений, выполненных на длине волны 18.0 см, дали значения радиояростных температур ледяного покрова для той же трассы пролетов самолета-лаборатории ИЛ-18, приведенные в табл. 1.

<sup>2</sup> Сроки таяния льдов (по данным наблюдений водомерных постов) подтверждают полученную по полю излучения характеристику состояния ледяного покрова: в Малом Севане лед растаял 10-12 апреля, в Большом - 16-19 апреля.

Т а б л и ц а 1

Радиояркостные температуры различных подстилающих поверхностей ( $\lambda=18$  см)

Поверхность	Характеристика поверхности	$T_{я, ср}$ , К
Прибрежная суша	Заснеженные горы	221.1
Ледяной покров	Белый лед	210.0
Большого Севана	Серо-белый лед	190 $\pm$ 1.3
	Белый лед	196.3
Ледяной покров	Серо-белый лед	174.4
Малого Севана	Серый лед	159.5 $\pm$ 1.9

Как видно из табл. 1, для всех градаций описанных льдов значения  $T_{я}$  на  $\lambda=18$  см ниже, чем на  $\lambda=2.1$  см, что соответствует результатам работы Курской и др. (1968). Сопоставление материалов микроволновой съемки на  $\lambda=18.0$  и  $2.1$  см выявляет также более сильную изменчивость излучения пресноводного льда в период его таяния для дециметрового канала. Контрасты излучения белого и серого льда на  $\lambda=18.0$  и  $2.1$  см составляют 50.5 К и 15.5 К соответственно. Это может быть объяснено значительно большей проникающей способностью длинноволновой части микроволнового диапазона и кроме того влиянием собственного излучения свободной воды, процент содержания которой в весенний период в тающем льду значителен (очевидно, что эта характеристика может быть связана с объемным весом данного типа льда). В микроволновом диапазоне ледяной покров может рассматриваться как бинарная смесь кристаллов льда и воды.

Для разделения жидкой и твердой фаз льда нами были выполнены расчеты коэффициентов излучения поверхности льда, а также зависимостей радиояркостных температур льда при изменении угла визирования. Пример результатов таких расчетов приведен в табл. 2. Данные по диэлектрическим константам льда различной структуры были любезно предоставлены нам доктором Рене Рамзайером из Департамента оборудования (Канада). Значения коэффициента излучения воды взяты из работы Рабиновича и Мелентьева (1970).

Как видно из табл. 2, угловые зависимости коэффициентов излучения воды и льда значительно отличаются друг от друга. Так, контраст излучения вода-лед для угла визирования  $50^\circ$  составляет 15.6 К при горизонтальной поляризации и 29.1 К — при вертикальной.

Как указывалось выше, самолетные измерения 7 1V 83 на  $\lambda=2.1$  см проводились при горизонтальной поляризации. Поэтому мы задались тремя условными градациями содержания воды в весеннем тающем льду: 1) малое, 2) среднее, 3) большое (лед

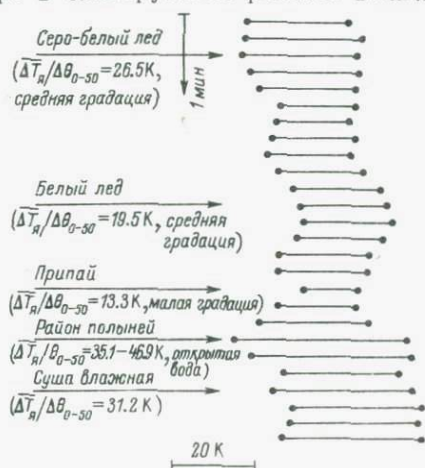
Т а б л и ц а 2

Коэффициенты излучения воды и льда при горизонтальной и вертикальной поляризации и контраст излучения при различных углах визирования

Подстилающая поверхность	Поляризация	Коэффициенты излучения ( $\epsilon$ ) при различных $\theta$			$\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta, \text{K}$	
		10°	30°	50°	0-30°	0-50°
Пресный лед ( $T_{\text{п}} = -8^\circ \text{C}$ )	Вертикальная	0.945	0.956	0.990	+2.9	+12.1
	Горизонтальная	0.945	0.920	0.855	-6.8	-24.3
Пресная вода ( $T_{\text{п}} = 0^\circ \text{C}$ )	Вертикальная	0.416	0.462	0.567	+12.5	+41.2
	Горизонтальная	0.416	0.372	0.292	-12.0	-39.9

максимально близок к разрушению). Этим трем градациям приписаны следующие значения контраста  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50}$ : 1) 15.0 К, 2) 15.0-25.0 К, 3) 25.0-35.0 К. Контраст  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50} > 35.0 \text{ K}$  соответствует участкам открытой воды.

На рис. 2 представлен образец регистрации излучения льда на Большом Севане на  $\lambda = 2.1 \text{ см}$ . Минимальное значение контраста  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50}$  относится к припайному льду. Льды белый и серо-белый отличаются как по абсолютному значению излучения ( $T_{\text{я}}; \epsilon > T_{\text{я}}; \epsilon$ ), так и по контрасту  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50}$ . Оба типа льда могут считаться средними по увлажнению, но серо-белый лед отличается большей концентрацией находящейся в нем свободной воды, так как для него значение  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50}$  выше. В районе заприпайной полыньи данные микроволнового радиометра в сканирующем режиме выявляют наличие открытой воды.



Любопытная картина распределения  $\Delta T_{\text{я}}/\Delta \theta_{0-50}$  зафиксирована при полете над увлажненной поверхностью суши. Величина контраста здесь очень велика, причем наблюдаются вариации по трассе полета, что связано, по-видимому, с изменением увлажнения почвы. Однако для количественной оценки увлажнения почвы по методике, основанной на анализе

Рис. 2. Вариации  $T_{\text{я}}$  ( $\lambda = 2.1 \text{ см}$ , режим сканирования).

угловой изменчивости излучения, необходимо знать диэлектрические константы данного типа почвы, как сухой, так и увлажненной.

Таким образом, рассмотренные результаты самолетных микроволновых измерений озерного пресноводного льда в период таяния выявили возможность определения по излучению ледяного покрова различных его характеристик, в том числе структуры, свободной воды во льду, что позволяет судить о таком важном его параметре, как плотность. Показаны также возможности выявления трещин, разводий, полыней, границ между пресным льдом и сушей, покрытой снегом, как при фиксированном угле визирования, так и в режиме сканирования.

### Л и т е р а т у р а

- Б о г о р о д с к и й В.В., К о з л о в А.И., Т у ч к о в Л.Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л., 1977. 224 с.
- К у р с к а я Н.А., Ф е д о р о в а Л.В., Я к о в л е в а Г.Д. Тепловое излучение льда в сантиметровом и дециметровом диапазонах. - Тр. ГГО, 1968, вып. 222, с. 54-61.
- Н и к и т и н П.А. Вариации радиотеплового излучения морских льдов. - Исследование Земли из космоса, 1980, № 5, с. 56-63.
- Н о м е н к л а т у р а морских льдов. Л., 1974. 76 с.
- Р а б и н о в и ч Ю.И., Л о ш и л о в В.С., Ш у л ь г и н а Н.М. Анализ результатов измерений характеристик ледяного покрова (вариант С). - В кн.: Советско-американский эксперимент „Беринг“. - Тр. заключительного симпозиума по итогам совместной советско-американской экспедиции. Л., 1975, с. 284-313.
- Р а б и н о в и ч Ю.И., М е л е н т ь е в В.В. Влияние температуры и солености на излучение гладкой водной поверхности в сантиметровом диапазоне. - Тр. ГГО, 1970, вып. 235, с. 78-123.
- Р а б и н о в и ч Ю.И., Щ у к и н Г.Г., Н о в о с е л о в А.И. Применение радиолокации в ледовой разведке. - Тр. ГГО, 1970, вып. 235, с. 67-71.
- С у н ц е в М.А. Подземный приток в озеро Севан. - В кн.: Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. Т. 1. Метеорология и гидрология. Ереван, 1961, с. 407-428.
- G l o e r s e n P., N o r d b e r g W., S c h m u g g e T.T. Microwave signatures of first-year and multiyear sea ice. - J. Geophys. Res., 1973, vol. 78, N 18, p. 3564-3572.

О. Б. Васильев, В. С. Гришечкин, А. П. Коваленко,  
И. А. Товстенко, Э. О. Шульц (НИИФ ЛГУ),  
К. Я. Кондратьев (ИНОЗ АН СССР)

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ  
КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ  
С ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И С САМОЛЕТА

Достаточно полное описание закономерностей поля коротковолновой радиации в атмосфере на основе эксперимента возможно лишь при условии осуществления комплексной программы наблюдений, включающей определение не только радиационных характеристик поля излучения, но и основных оптических параметров атмосферы.

Первоначально созданный комплекс спектральной аппаратуры, описанной наиболее полно в работах Кондратьева и соавторов (1963, 1964), был предназначен для измерения спектральных потоков прямой солнечной, рассеянной, суммарной и отраженной радиации на уровне земной поверхности. Спектрометры конструировались, как правило, на основе серийной спектральной аппаратуры с добавлением ряда специальных узлов и предназначались для измерения отдельных характеристик поля излучения и оптических параметров атмосферы. Этот факт создавал определенные трудности в интерпретации получаемых экспериментальных данных в силу сложности системы поверки и калибровки столь разнообразной по составу аппаратуры.

Дальнейшая модернизация измерительной спектральной аппаратуры была подчинена выполнению следующих требований: а) обеспечению достаточной точности измерений; б) сокращению времени фотометрирования; в) получению на выходе прибора нормального спектра, выраженного в абсолютных энергетических единицах; г) повышению надежности при эксплуатации спектральной аппаратуры не только на земле, но и на судах, самолетах и спутниках.

Следуя этим требованиям, на кафедре физики атмосферы НИИФ ЛГУ был создан многоцелевой коротковолновый спектрометр К-2, а затем его модернизированный вариант К-3 (Балдин, Ивлев, 1976; Овчаренко, Товстенко, 1976).

Спектрометр позволяет за малый промежуток времени измерять: спектральные потоки падающей и отраженной радиации, спектральные потоки прямой солнечной радиации, спектральную яркость неба и подстилающей поверхности в разных азимутах и на различных угловых расстояниях от надира с поверхности земли и с самолета.

Ниже описывается информационно-измерительная система для исследования поля коротковолнового излучения, созданная на базе спектрометра К-3 и реально используемая в полевых условиях и на самолете-лаборатории ИЛ-14.

## 1. Спектрофотометр К-3

### 1.1. Характеристики спектрометра К-3

Спектральный диапазон прибора - 0.30-1.0 мкм, угол поля зрения ( $4'$ ,  $8'$  или  $12'$ )  $\times 2^\circ$  (при измерениях яркости неба и подстилающей поверхности),  $180^\circ$  (при измерениях потоков излучения). Время сканирования всего спектрального диапазона 7 с. Рабочая спектральная ширина щели  $\sim 3$  нм. Число фиксируемых измерений 365. Габариты - 550  $\times$  200  $\times$  200 мм. Вес 15 кг.

Конструктивно система состоит из зеркального дифракционного монохроматора, специальных осветителей и приемно-усилительной и регистрирующей систем.

### 1.2. Монохроматор

Монохроматор спектрометра построен по вертикально-симметричной схеме. Диспергирующим элементом является дифракционная решетка 600 шт./мм. Дисперсия монохроматора 5.5 нм/мм. Рабочий порядок - первый, нерабочие порядки „отрезаются“ светофильтрами. Сканирование спектра осуществляется качанием дифракционной решетки с помощью кулачкового механизма. Монохроматор имеет три выходных щели, за которыми установлены три фотоумножителя. Применение трех выходных щелей и фотоумножителей с различными фотокатодами позволяет регистрировать весь спектральный интервал без потери времени на смену фотоумножителей и светофильтров. Геометрическая ширина входной и выходной щелей может принимать значения 0.1, 0.3 и 1.0 мм.

Преимуществом вертикально-симметричной схемы, где входная и выходная щели расположены выше и ниже решетки, помимо компактности является значительное уменьшение влияния паразитного рассеянного света на выходных щелях, так как дифрагмированные лучи не могут попасть на решетку. Анализ формул для вычисления aberrаций монохроматора (Пейсахсон, 1975) показывает, что в выбранной схеме полностью отсутствует кома децентровки. Зато для всех точек, кроме центра спектрограммы, характерен астигматизм второго порядка и нигде, кроме середины спектра, нельзя получить резкого изображения щели. Кроме того, изображение прямой входной щели не только искривляется, но и наклоняется. Конструкция используемого монохроматора предусматривает соответствующие наклоны выходных щелей и плоскости изображения. Расчет поперечных волновых aberrаций и аппаратной функции монохроматора прово-

дился по программе расчета оптических нецентрированных систем. По расчету уширение ( $S_g$ ) полуширины аппаратной функции не превышает 0.05 мм. Эффективная ширина щели может быть оценена по соотношению

$$S_{\text{эф}} = S + k S_g, \quad (1)$$

где  $S$  - реальная геометрическая ширина щели;  $S_g$  - абберационное уширение;  $k$  - коэффициент, принимающий при различных абберациях значения от 0.08 до 0.25.

Принимая  $k = 0.25$ , получим увеличение полуширины аппаратной функции на 0.0125 (или на 4%). Эффективная спектральная ширина щели монохроматора ( $\Delta \lambda_{\text{эф}} = D \cdot S_{\text{эф}}$ ) равна 1.7 нм.

На рис. 1 представлена реальная аппаратная функция монохроматора, полученная с помощью лазера. Как видно, полуширина аппаратной функции составляет действительно  $\sim 3$  нм.

### 1.3. Пятиканальный осветитель

Схема осветителя представлена на рис. 2. Первый канал осветителя (а) подает на входную щель монохроматора излучение от малого участка неба или подстилающей поверхности. Угол зрения этого канала составляет ( $4'$ ,  $8'$  или  $12'$ )  $\times 2^\circ$  в зависимости от ширины входной щели монохроматора. Таким образом, этот канал служит для измерения спектральной яркости неба (поверхности) с высоким угловым разрешением. Канал (а) состоит из кварцевой линзы - объектива (1) с фокусным расстоянием 300 мм. Линза установлена так, что ее фокальная плоскость совпадает с плоскостью входной щели (2), поэтому на ней образуется изображение спектрофотометрируемого участка неба (поверхности), из которого входная щель, играющая в этом случае роль полевой диафрагмы, вырезает требуемый участок. Линза вмонтирована в круглую трубу (3), содержащую ряд диафрагм и выполняющую роль бленды сложного типа.

Второй канал осветителя (б) служит для измерения прямой солнечной радиации. Угол поля зрения, формируемый диафрагмами, составляет  $2^\circ$ . В качестве нейтрального ослабителя используется тонкая пластина из молочного стекла (4).

Третий канал осветителя (в) используется при измерении спектральных потоков падающего и отраженного солнечного излучения. Канал подает на входную щель монохроматора излучение, проинтегрированное по полусфере пространства, и состоит из плоскопараллельной пластины, изготовленной из молочного стекла МС-23 (5), вмонтированной в зачерненную трубу. Молочная пластина представляет собой интегратор излучения, входящего из полусферы.

Четвертый канал (г) направляет на входную щель монохроматора излучение фотометрического стандарта (6). Стандартом служит низковольтная лампочка накаливания, питание которой

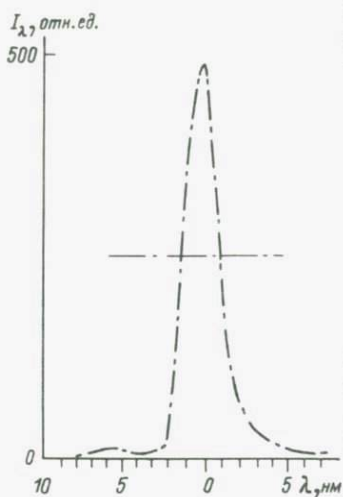


Рис. 1. Реальная аппаратная функция монохроматора.

стабилизировано (коэффициент стабилизации не хуже  $4 \cdot 10^{-3}$ ). Фотометрический стандарт служит для периодической проверки постоянства чувствительности прибора и выполняет функцию «вторичного» абсолютного стандарта.

Пятый канал (д) служит для контроля постоянства спектральной градуировки монохроматора с помощью стандарта длин волн (7) и ртутной лампы УФО.

Все каналы осветителя оптически независимы и могут работать попеременно. Все насадки легкоъемные. Выбор канала осуществляется с пульта управления спектрометра.

В самолетном варианте измерительного комплекса некоторые виды измеряемого излучения направляются на вход спектрометра с помощью внешних осветительных устройств (рис. 2, е и ж).

При измерениях нисходящих и восходящих потоков солнечной радиации в качестве осветителя используется «световод», представляющий собой зачерненную внутри трубу (1) с поворотным зеркалом (2) посередине и интегрирующими насадками (3) из молочного стекла МС-23 на концах. Диаметр насадок, длина первого и второго колена световода (часть трубы до поворотного зеркала) соответственно одинаковы. Диаметр насадок выбран так, чтобы входная щель монохроматора была полностью засвечена. Вид измеряемого потока определяется положением поворотного зеркала. Контроль оптического постоянства каждого колена световода и их соотношения осуществляется с помощью переносного эталонного источника, представляющего собой лампочку накаливания, вмонтированную в полусферический отражатель.

Измерения с самолета углового распределения яркости неба и подстилающей поверхности осуществляются с помощью поворотной головки, установленной на месте иллюминатора самолета. Поворотная головка представляет собой зеркало (4) с механическим приводом (5), закрытое от воздушного потока обтекаемым кожухом (6). Головка позволяет направлять на вход монохроматора излучение неба в плоскости вертикала (по курсу самолета) под разными углами от зенита до горизонта и подстилающей поверхности от горизонта до надира. Точность наведения головки не хуже  $\pm 1^\circ$ .

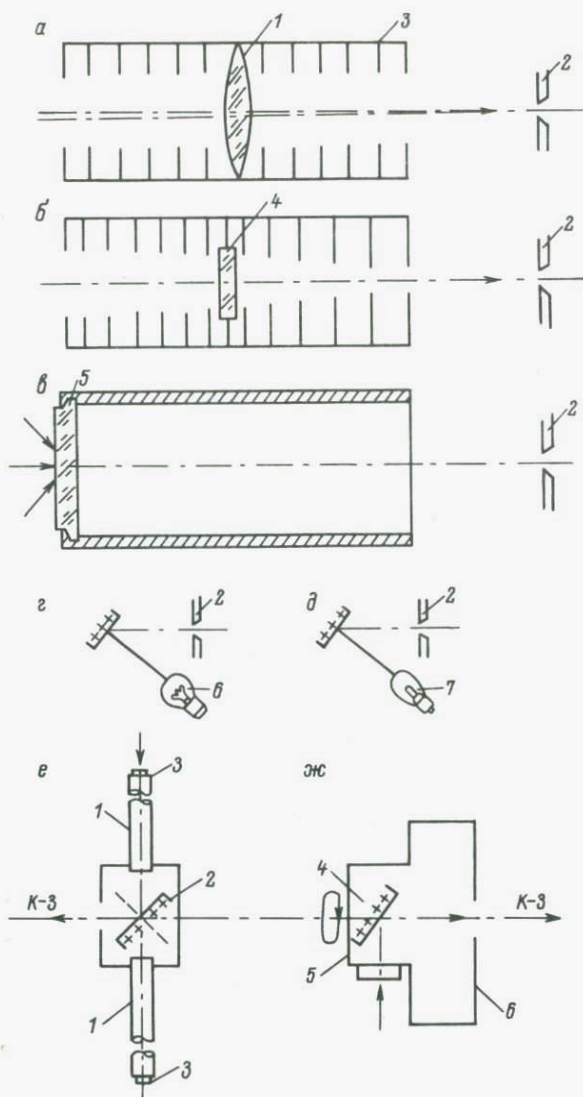


Рис. 2. Оптическая схема каналов осветителя спектрометра К-3.

Внутренний осветитель. Каналы: а - яркости, б - прямой солнечной радиации, в - потоков солнечной радиации, г - фотометрического стандарта, д - стандарта длин волн. Внешний осветитель (самолетный). Каналы: е - потоков солнечной радиации, ж - яркости.

## 2. Приемно-усилительная система спектрометра К-3

Приемно-усилительная система спектрофотометра включает следующие узлы:

- фотоэлектрические приемники излучения (ФЭУ) с предусилителями;
- аттенюаторы;
- коммутирующее устройство;
- усилитель переменного тока;
- источник опорного напряжения;
- синхронный детектор;
- блок управления (автоматики);
- источник стабилизированного высоковольтного напряжения для питания ФЭУ;
- источник стабилизированного напряжения для питания эталонной лампы;
- источник стабилизированного напряжения для питания узлов усилительного тракта.

Электрические сигналы с фотоэлектрических умножителей (ФЭУ-28, ФЭУ-51, ФЭУ-67) поступают на истоковые повторители и далее через аттенюаторы и коммутирующее устройство по экранированным проводам подаются на усилитель переменного тока. После усиления сигнал поступает на синхронный детектор, который управляется импульсами, синфазными с исследуемым сигналом. Для визуального контроля за величиной и формой выходного сигнала используются микроамперметр (МА-0-100) и электронный осциллограф С1-68.

Аттенюаторы позволяют в  $n$  ( $n \leq 10$ ) приемов ослабить подаваемые на коммутатор сигналы  $\sim$  в  $2^n$  (до  $10^3$ ) раз. Коммутатор сигналов состоит из трех реле типа РЭС-49, которые поочередно автоматически (или с помощью ручного управления) подключают ко входу усилителя выхода соответствующие аттенюаторы. Питание системы осуществляется от стабилизированных источников напряжения, питание ФЭУ — от высоковольтного преобразователя напряжения ( $U_{\text{вых}} = 1500$  В); для питания эталонной лампы используется автономный стабилизатор напряжения.

Схема автоматики и управления позволяет осуществлять следующие операции:

- производить автоматическую запись одного цикла измерений (три участка спектра: ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный) после нажатия кнопки „запись“;
- осуществлять поворот столика осветителя монохроматора в положения „эталон“, „сигнал“;
- поворачивать входное зеркало приемной осветительной головки на нужный угол.

## 2.1. Предусилитель

Принципиальная схема предусилителя показана на рис. 3.

Предусилитель служит:

- для согласования большого выходного сопротивления ФЭУ с низким входным сопротивлением усилителя;
- для передачи сигнала по достаточно длинному ( $\sim 30$  м) экранированному кабелю, так как благодаря низкому выходному сопротивлению ( $R_{\text{вых}} = 200 \text{ Ом}$ ) уменьшается влияние собственной емкости кабеля и снижается уровень помех, наводимых на вход усилителя.

Предусилители собраны по схеме истокового повторителя на полевом транзисторе КП103М. Цепочка  $R_{59}$ ,  $D_{11}$ ,  $D_{12}$  служит для защиты перехода «затвор-исток» полевого транзистора от случайных помех большой амплитуды. Если напряжение помехи превысит определенный уровень ( $\sim 25 \text{ В}$ ), то диод  $D_1$  или  $D_2$  (в зависимости от полярности напряжения помехи) резко снизит свое сопротивление, и напряжение помехи выделится на сопротивлении  $R_{59}$ . На вход транзистора подается напряжение, величина которого существенно меньше критического для пробоя перехода. Включение сопротивления  $R_{42}$  в часть нагрузки необходимо для обеспечения правильного режима работы транзистора, а также для увеличения входного сопротивления повторителя ( $R_{\text{вх}} = 10 \text{ МОм}$ ). Рабочая точка подбирается изменением сопротивления  $R_{40}$  до получения симметричного ограничения сигнала или половинного напряжения источника питания на истоке транзистора.

Сопротивление  $R_{43}$  является нагрузочным для ФЭУ, а конденсатор  $C_{13}$  не пропускает постоянную составляющую с ФЭУ на вход повторителя. Конденсатор  $C_{12}$  также является разделительным.

## 2.2. Усилитель переменного тока

Схема усилителя переменного тока приведена на рис. 4.

Усилитель состоит из двух каскадов усиления по напряжению, собранных на транзисторах КТ315Б (Т15) и МП25Б (Т16), и двухтактного усилителя мощности на транзисторах МП25Б (Т17) и МП37Б (Т18). Цепочка  $R_{31}$ ,  $D_5$  на входе усилителя служит для защиты эмиттерного перехода транзистора Т15 от пробоя в случае попадания на вход большого напряжения. Принцип действия цепочки аналогичен работе такой же цепочки в предусилителях. В усилителе существует глубокая отрицательная обратная связь по переменному и постоянному току ( $R_{33}$ ,  $R_{35}$ ,  $C_{12}$ ,  $R_{32}$ ), что обеспечивает относительно большое входное сопротивление ( $R_{\text{вх}} = 100 \text{ кОм}$ ) и хорошую температурную стабильность усилителя. В усилителе существует и положительная обратная связь ( $C_{14}$ ,  $Tp_2$ ), которая увеличивает динамический диапазон и коэффициент усиления усилителя. Наличие

емкости  $C_{11}$  в цепочке отрицательной обратной связи делает последнюю частотно зависимой, что обеспечивает некоторую избирательность усилителя и позволяет снизить уровень помех на его выходе. Сопротивление  $R_{36}$  необходимо для устранения в выходном сигнале искажения типа „ступенька“. Трансформатор  $Tr_2$  необходим для того, чтобы выходной сигнал можно было снижать относительно корпуса прибора, что в свою очередь необходимо для подключения различных регистрирующих приборов, имеющих вход относительно корпуса. Сопротивлением  $R_{35}$  подбирается глубина отрицательной обратной связи так, чтобы коэффициент усилителя был равным  $\sim 300$ . Сопротивлением  $R_{32}$  подбирается режим работы усилителя так, чтобы напряжение на эмиттерах транзисторов  $T_{17}$ ,  $T_{18}$  было равным половине напряжения питания.

Технические характеристики усилителя следующие:  
 $K_{ус} = 300$ ,  $R_{вх} = 100$  кОм,  $R_{вых} = 200$  Ом,  $U_{пит} = 22$  В,  $f = 1500$  Гц,  
 $f_{пр} = 500$  Гц,  $K_{ни} = 1\%$ ,  $U_{вых.мах} = 6$  В.

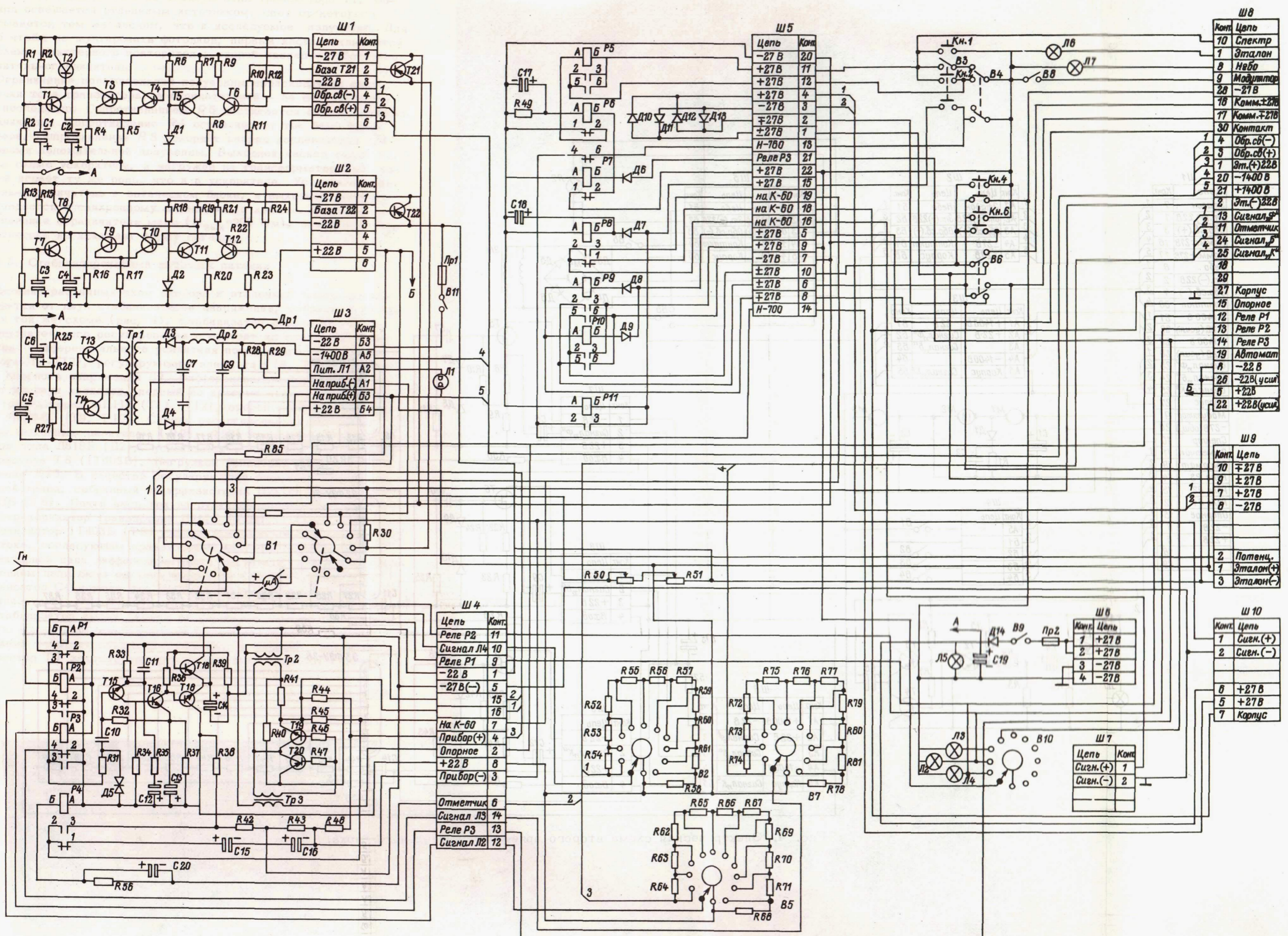
### 2.3. Синхронный детектор

Служит для линейного выпрямления исследуемого сигнала, а также для улучшения помехоустойчивости прибора. Детектор (рис. 4) собран по схеме двухполупериодного детектирования на транзисторах МП38А ( $T_{19}$ ) и МП25Б ( $T_{20}$ ). Управляется импульсами, подаваемыми с трансформатора  $Tr_3$  на базы транзисторов через сопротивления  $R_{46}$  и  $R_{47}$ . Исследуемый сигнал с трансформатора  $Tr_2$  подается через сопротивления  $R_{40}$ ,  $R_{41}$  на эмиттеры транзисторов  $T_{19}$ ,  $T_{20}$ . Коллекторы являются общей точкой для сигнала и для управляющих импульсов. Выпрямленное напряжение снимается с эмиттеров транзисторов  $T_{19}$ ,  $T_{20}$ , причем эмиттер транзистора  $T_{20}$  заземлен. Таким образом, выходной сигнал снимается относительно корпуса прибора, при этом фаза управляющих импульсов подбирается такой, чтобы напряжение на входе было положительным относительно корпуса.

Работает синхронный детектор следующим образом: управляющие импульсы поочередно, в зависимости от полярности, открывают один транзистор и закрывают другой, а так как они синфазны с исследуемым сигналом, то напряжение на выход проходит в строго определенной полярности. Фаза опорных импульсов подбирается вращением специального винта, двигающего осветитель фотодиода, по максимуму сигнала на выходе.

### 2.4. Усилитель-ограничитель

Служит источником управляющего напряжения синхронного детектора и вырабатывает прямоугольные импульсы амплитудой 10 В и частотой следования  $f = 1500$  Гц (рис. 4). Собран на четырех транзисторах типа МП25Б ( $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ) и МП37Б ( $T_4$ ).



Ш1

Цепь	Конг.
-27 В	1
База Т21	2
-22 В	3
Обр.сб(-)	4
Обр.сб(+)	5
	6

Ш2

Цепь	Конг.
-27 В	1
База Т22	2
-22 В	3
+22 В	5
	6

Ш3

Цепь	Конг.
-22 В	Б3
-1400 В	А5
Пит. Л1	А2
На прибор(+)	А1
На прибор(-)	Б3
+22 В	Б4

Ш4

Цепь	Конг.
Реле Р2	11
Сигнал Л4	10
Реле Р1	9
-22 В	1
-27 В(-)	5
	15
	16
На К-60	7
Прибор(+)	4
Опорное	2
+22 В	8
Прибор(-)	3
Отметчик	6
Сигнал Л3	14
Реле Р3	13
Сигнал Л2	12

Ш5

Цепь	Конг.
-27 В	20
+27 В	17
+27 В	12
+27 В	4
-27 В	3
±27 В	2
±27 В	1
Н-760	18
Реле Р3	21
+27 В	22
+27 В	15
на К-60	19
на К-60	16
±27 В	5
+27 В	9
-27 В	7
±27 В	10
±27 В	6
±27 В	8
Н-700	14

Ш8

Конг.	Цепь
10	Спектр
1	Эталон
8	Небо
9	Модулятор
28	-27 В
18	Комм.±27 В
17	Комм.±27 В
30	Контакт
4	Обр.сб(-)
3	Обр.сб(+)
1	Эт.(+)-22 В
3	Эт.(+)-22 В
4	20 -1400 В
5	21 +1400 В
2	Эт.-22 В
13	Сигнал Л3
11	Отметчик
24	Сигнал Л5
25	Сигнал Л4
18	
27	Корпус
15	Опорное
12	Реле Р1
13	Реле Р2
14	Реле Р3
19	Автомат
8	-22 В
26	-22 В(усил)
5	+22 В
22	+22 В(усил)

Ш9

Конг.	Цепь
10	±27 В
9	±27 В
7	+27 В
8	-27 В
2	Потенц.
1	Эталон(+)
3	Эталон(-)

Ш10

Конг.	Цепь
1	Сигн.(+)
2	Сигн.(-)
6	+27 В
5	+27 В
7	Корпус

Ш7

Цепь	Конг.
Сигн.(+)	1
Сигн.(-)	2

Рис. 3. Электрическая схема первого приемно-усилительного блока.

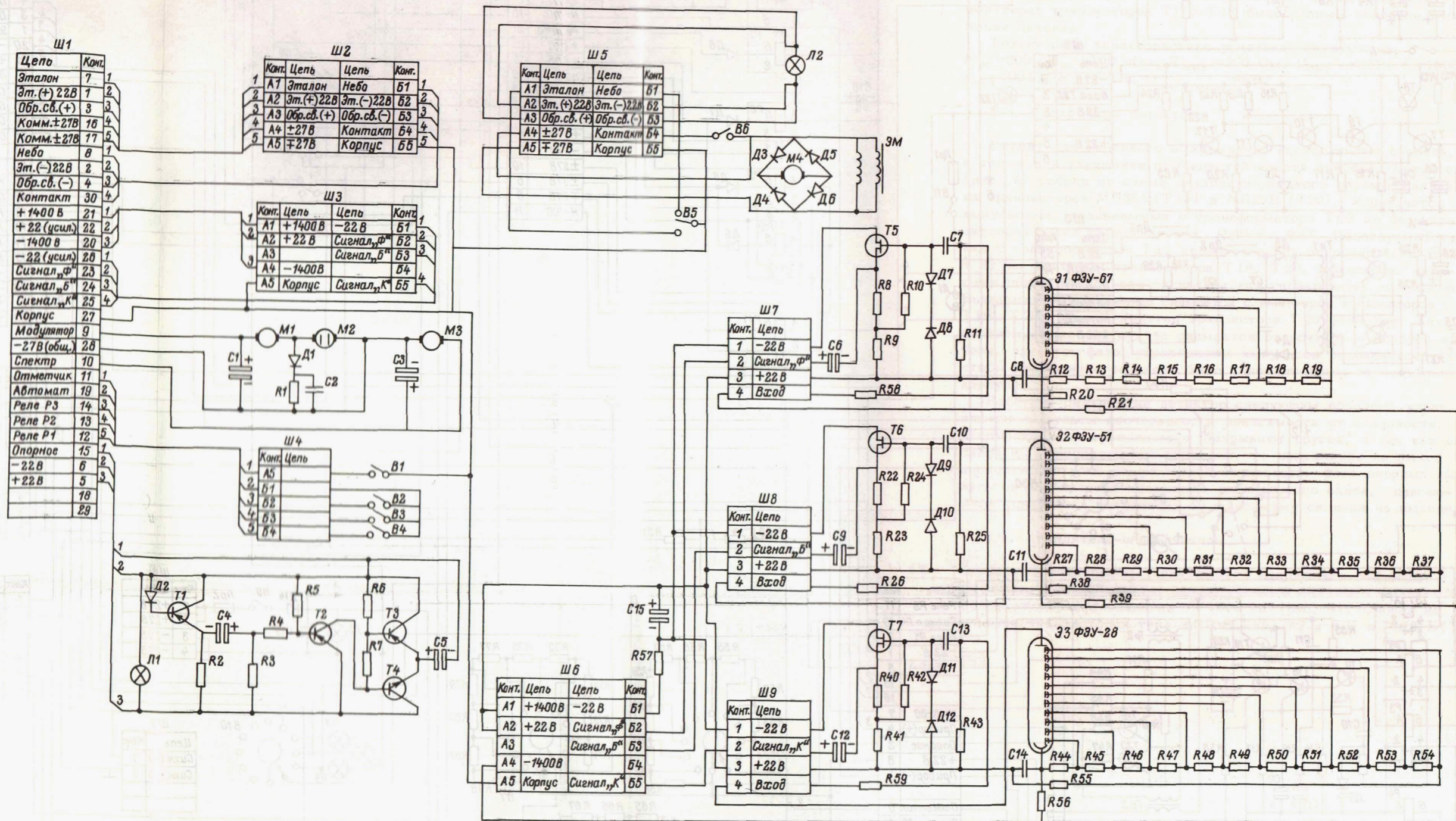


Рис. 4. Электрическая схема второго приемно-усилительного блока.

Ограничитель приводится в действие сигналом от фотодиода ФД-3 (Д2), включенного во входную цепь транзистора Т1. Фотодиод освещается отдельным источником, свет от которого прерывается тем же диском, что и исследуемое излучение. Для того чтобы не шунтировать фотодиод, первый каскад включается по схеме эмиттерного повторителя; второй каскад – собственно усилитель-ограничитель.

Ограничение положительной полуволны происходит за счет отсечки тока транзистора, а отрицательной – за счет насыщения последнего. Сопrotивлением  $R5$  достигается симметричность ограничения. Сопrotивление  $R4$  ограничивает ток базы транзистора. Сопrotивление  $R3$  ускоряет разряд конденсатора  $C4$  во время положительной полуволны. Выходной каскад такой же, как в схеме ускорителя, и нагружен на трансформатор Тр3, который играет ту же роль, что и в ускорителе. Установлен усилитель-ограничитель в оптическом блоке, и выходное напряжение подается к синхронному детектору по кабелю. Выходное сопротивление ограничителя мало ( $R_{\text{вых}}=200 \text{ Ом}$ ), поэтому кабель практически не искажает форму сигнала.

## 2.5. Стабилизированный источник питания

Питание различных схем прибора и эталонной лампы осуществляется от двух стабилизаторов напряжения, собранных по одной и той же схеме (рис. 4). Стабилизатор собран по схеме последовательного регулирования и состоит из следующих элементов: дифференциального усилителя постоянного тока (транзисторы Т8–Т12), регулирующего элемента (Т8, Т22), источника опорного напряжения Д2. Дифференциальный усилитель состоит из двух каскадов, первый из которых собран на кремниевых транзисторах МП116 (Т11, Т12), второй – на транзисторах типа МП25Б (Т9, Т10). Сигнал рассогласования снимается между выходным делителем ( $R22$ ,  $R23$ ) и опорным стабилизатором типа Д818Е (Д2), усиливается и подается в цепь базы транзистора Т8 (1Т403Б). Нагрузкой усилителя является сопротивление  $R15$ . В качестве регулирующего элемента служит составной триод, собранный на транзисторах П217Б (Т22) и 1Т403Б (Т8). Почти весь ток нагрузки проходит через цепь эмиттер-коллектор транзистора П217Б (Т22).

Транзистор 1Т403Б (Т8) служит предварительным усилителем тока, согласующим сравнительно высокое сопротивление коллекторной цепи дифференциального усилителя с низким сопротивлением цепи базы регулирующего транзистора П217Б (Т22). Конденсатор  $C4$  служит для предупреждения самовозбуждения стабилизатора.

Стабилизатор имеет защиту от короткого замыкания, собранную на транзисторе МП25Б (Т7).

Схема работает следующим образом: в рабочем состоянии транзистор Т7 закрыт, так как на его базу подается постоян-

ный потенциал, снимаемый с делителя  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ , а эмиттер подключен к выходу стабилизатора и имеет потенциал выше потенциала базы. При коротком замыкании эмиттер транзистора  $T_7$  подключается к плюсовой шине, он открывается, подключая базу транзистора  $1T403B$  ( $T_8$ ) к плюсовой шине, и закрывает тем самым регулирующий транзистор  $P217B$  ( $T_{22}$ ). Конденсатор  $C_3$  предотвращает срабатывание схемы в момент включения. Сопротивление  $R_{24}$  увеличивает коэффициент стабилизации.

Применение термостабильного стабилитрона типа  $D818E$ , термостабильных сопротивлений в выходном делителе типа ПТМН ( $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ), а также кремниевых транзисторов в первом каскаде дифференциального усилителя позволило значительно повысить термостабильность стабилизатора, которая составляет 0.001% на градус. Коэффициент стабилизации стабилизатора – 1000. Напряжение на выходе 22В, пределы изменения входного напряжения 24–32 В. Ток нагрузки 0–1 А.

Стабилизатор питания эталонной лампы отличается только лишь тем, что напряжение на делителе  $R_{22}$ ,  $R_{23}$  снимается непосредственно с эталонной лампы, которая находится в оптическом блоке. Это необходимо для того, чтобы исключить влияние подводящих проводов на стабильность напряжения на лампе. Кроме того, эталонный стабилизатор имеет большую площадь радиатора, так как лампа потребляет больший ток ( $I=1$  А), чем остальная схема.

## 2.6. Высоковольтный преобразователь напряжения

Служит для питания фотоумножителей. Собран по двухтактной схеме с общим эмиттером на транзисторах  $1T403B$  ( $T_{13}$ ,  $T_{14}$ ) (рис. 4). Трансформатор  $Tr_1$  собран на броневом сердечнике типа  $СБ-302000НМ3$ . Напряжение со вторичной обмотки подается на выпрямитель, который собран на диодах  $2Ц103А$  ( $D_3$ ,  $D_4$ ) по схеме удвоения. На выходе выпрямителя включен фильтр, состоящий из дросселя  $Dp_2$  и конденсатора  $C_9$ . Напряжение на выходе  $U_{\text{вых}} = 1500$  В. Для того чтобы преобразователь не создавал помех в цепи питания, на его входе установлен фильтр  $Dp_1$ ,  $C_5$ . Дроссели  $Dp_1$  и  $Dp_2$  намотаны на ферритовом кольце типа  $18 \times 10 \times 4,5$   $M2000НМ1$ . Высокое напряжение по экранированному кабелю подается в оптический блок, где через соответствующие сопротивления разветвляется на три ФЭУ, причем для улучшения фильтрации перед каждым ФЭУ установлен  $C$ -фильтр. Сопротивление фильтра одновременно снижает напряжение на ФЭУ до соответствующей величины (ФЭУ–28 – 1350 В, ФЭУ–51 – 900 В и ФЭУ–67 – 750 В). Питается преобразователь стабилизированным напряжением  $U_{\text{пит}} = 22$  В.

## 2.7. Схема автоматики

Служит для автоматической записи всего спектра, а также для вращения оптического столика коммутатора или выносной поворотной головки. Схема автоматической записи (рис. 4) работает следующим образом: при включении тумблера „автомат” В2 подается питание в цепи реле Р5, Р8, Р11. При нажатии на кнопку „запись” включается: двигатель, вращающий дифракционную решетку (М1), двигатель магнитофона, а также реле Р5, Р8, Р11. При отпускании кнопки „запись” все остается включенным, так как кнопка блокируется контактами реле Р5 и Р11. При включении „красного” участка спектра срабатывает реле Р7 и своими нормально замкнутыми контактами рвет цепь питания реле Р6. Когда „красный” участок спектра заканчивается, а тем самым и весь спектр, реле Р7 включается и своими контактами включает питание в цепь реле Р6, которое срабатывает на короткое время, определенное емкостью С17, сопротивлением R49 и сопротивлением обмотки реле Р6. Своими нормально замкнутыми контактами реле Р6 рвет цепь питания реле Р5, Р8, Р11, и сканирующее устройство прибора автоматически останавливается в начале фиолетового участка спектра. После этого схема готова к записи нового цикла. Контактными реле Р8 включается регистрирующее устройство с записью на магнитофон. Диоды Д6 и Д7 включены для того, чтобы исключить взаимовлияние реле Р7, включающее сигнал от „красного” ФЭУ (Р3), а также реле Р8 и Р11 (диод Д7). Конденсатор С18 необходим для того, чтобы задержать на некоторое время работу регистрирующего устройства после включения „красного” участка спектра и записать вспомогательный репер, который идет сразу за „красным” участком спектра.

В схеме предусмотрена кнопка „спектр” (Кн1), которая позволяет автоматически прогонять весь спектр без включения магнитофона. Это сделано для удобства подбора коэффициентов усиления на всех участках спектра. Схема предусматривает также работу без автоматики, при этом действуют тумблер „спектр” (В3) и кнопка „спектр” (Кн1), позволяющие включать сканирующее устройство на время, определяемое периодом включенного состояния тумблера В3 или кнопки Кн1.

## 3. Регистрирующая система спектрометра К-3

Регистрирующая система спектрометра К-3 состоит из блока управления магнитной записью (БУМЗ) и заполняющего устройства (ЗУ). Блок управления БУМЗ работает в двух режимах: режиме записи и режиме воспроизведения. Записываемый сигнал поступает на аналогоцифровой преобразователь (АЦП) – преобразователь Ф-7077/1, который работает в режиме внешнего запуска. Импульсы запуска формируются в оптическом блоке К-3, причем каждый импульс запуска соответствует строго оп-

ределенной длине волны. Весь диапазон длин волн – всего 640 отсчетов. Каждый отсчет представляется 11-разрядным двоичным числом, один разряд которого отведен под знак числа. Параллельный двоичный код, получаемый на выходе АЦП, преобразуется в последовательный и записывается на магнитную ленту в виде пачки импульсов, в который каждому двоичному разряду соответствует один период синусоиды, при этом единицы записываются большой амплитудой, а нули – малой. Отношение амплитуд выбирается в пределах 5–15В в зависимости от динамического диапазона ЗУ.

При воспроизведении сигнал разделяется по амплитуде на информационные и синхронизирующие импульсы, затем производится обратное преобразование, последовательный код преобразуется в параллельный и подается на выходной разъем. Каждый отсчет на выходном разъеме сопровождается импульсом конца преобразования (ИКП). В дальнейшем этот сигнал через согласующее устройство подается в ЭВМ ДЗ–28.

В качестве ЗУ используется бытовой магнитофон „Маяк–205“. Запись производится на одну дорожку с плотностью 65 бит на миллиметр, по второй дорожке записывается звуковой бортжурнал. Достоверность записи воспроизведения  $10^{-6}$  с достоверной вероятностью 0,999.

### 3.1. Режим записи

Импульс запуска ИКИ (импульс конца измерения) поступает на вход триггера цикла (ТГЦ), выходной сигнал которого решает прохождение импульсов с выхода ФПИ (формирователь прямоугольных импульсов) на двоичный счетчик (СТ) (рис. 5, а). ФПИ формирует прямоугольные импульсы из синусоидального сигнала, который поступает от задающего генератора (ЗГ). Далее сигналы со счетчика поступают на дешифратор (ДШ). Выходные сигналы дешифратора управляют двенадцатью схемами совпадения (И1–И12), на входы которых подаются 12 выходных сигналов с аналого-цифрового преобразователя (АЦП). С выходов И1–И12 сигналы поступают на схему (И13). В результате на выходе И13 образуется пачка информационных импульсов, которая подается на формирователь сигнала записи (ФСЗ), кроме того, на него же подаются два импульса с дешифратора, один из которых подается перед пачкой, а другой после нее. С помощью этих двух импульсов в выходном сигнале формируются два служебных импульса, которые необходимы для нормальной работы канала воспроизведения. Кроме того, СТ обнуляется задним фронтом второго служебного импульса. Пачка информационных импульсов вместе с двумя служебными импульсами управляет синусоидальным кодом, существующим на выходе АЦП, причем „1“ информации соответствует большая амплитуда одного периода синусоиды, а „0“ информации – меньшая. Уровень выходного сигнала, соответствующего 0-м информации

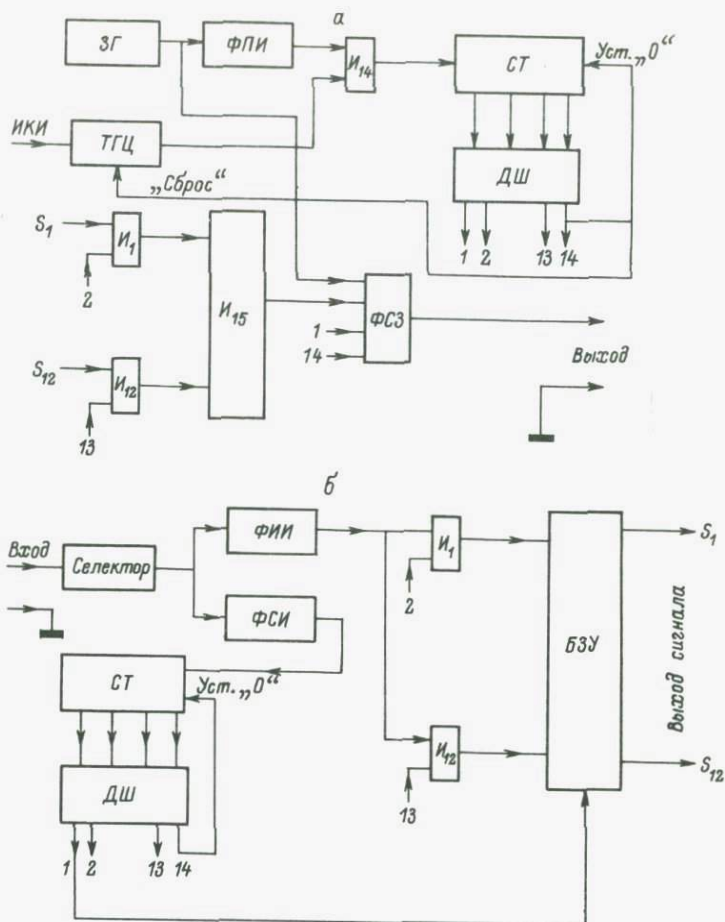


Рис. 5. Функциональная схема регистрирующего блока.  
а - канал записи, б - канал воспроизведения.

онным импульсам, выбран в 20 раз больше уровня шумов ЗУ, а уровень, соответствующий "1"-м информационным импульсам, больше нулевых в 5-15 раз (в зависимости от динамического диапазона ЗУ).

### 3.2. Режим воспроизведения

С выхода ЗУ сигнал поступает на селектор, который выделяет из первого полупериода каждого периода информации синхриимпульс СИ, а из второго - информационный импульс ИИ (рис. 5, б). Далее выделенные полупериоды поступают на формирователи информационных и синхриимпульсов ФИИ и ФСИ, которые преобразуют полупериоды синусоид в прямоугольные

импульсы, причем на выходе ФИИ образуются импульсы, соответствующие только большой амплитуде сигнала записи. С выхода ФСИ сигнал поступает на СТ, нагрузкой которого является ДШ, выходные импульсы которого управляют двенадцатью схемами совпадений И1-И12. На все входы И1-И12 поступают импульсы с выхода ФИИ. С выходов И1-И12 сигнал поступает на буферное запоминающее устройство БЗУ, представляющее собой 12 триггеров, с выходов которых сигналы поступают на выходной разъем. Первый управляющий импульс с ДШ устанавливает все триггеры БЗУ в нулевое состояние, подготавливая его тем самым к приему следующей пачки. СТ обнуляется передним фронтом 2-го служебного импульса. В связи с тем что система должна иметь большую чувствительность по каналу синхроимпульсов, предусмотрена такая работа ФСИ, при которой на его выходе импульсы могут появиться только с момента прихода импульса большой амплитуды, каковым и является первый служебный импульс. Второй служебный импульс необходим для снятия разрешения на прохождение СИ.

#### Л и т е р а т у р а

- Б а л д и н П.Ю., И в л е в Ю.С. Конструкция фотоэлектрического дифракционного коротковолнового спектрометра К-3 (оптико-механические блоки). - В кн.: Проблемы физики атмосферы, 1976, вып. 13, с. 117-120.
- К о н д р а т ь е в К.Я., Б у р г о в а М.П., Г р и ш е ч к и н В.С., М и х а й л о в В.В., П е т е л и н Г.М. Исследование спектрального распределения коротковолновой радиации. - В кн.: Проблемы физики атмосферы, 1963, вып. 2, с. 67-85.
- К о н д р а т ь е в К.Я., Б у р г о в а М.П., М и х а й л о в В.В., Г р и ш е ч к и н В.С., П е т е л и н Г.М., О т т о А.Н., М и р о н о в а З.Ф. Комплекс спектральной аппаратуры для исследования поля коротковолнового излучения в атмосфере. - В кн.: Международный симпозиум по исследованию радиационных процессов. Л., 1964.
- О в ч а р е н к о В.В., Т о в с т е н к о И.А. Конструкция фотоэлектрического дифракционного коротковолнового спектрометра К-3 (электронные блоки). - В кн.: Проблемы физики атмосферы, 1976, вып. 13, с. 120-124.
- П е й с а х с о н И.В. Оптика спектральных приборов. Л., 1975. 312 с.

МЕТОДОЛОГИЯ СБОРА ОПЕРАТИВНОЙ  
ОПОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ПОЛИГОНАХ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ

Для получения информации об изменениях состояния окружающей среды под действием антропогенного фактора в СССР создается система мониторинга природной среды (Израэль, 1974; Израэль и др., 1978). Наиболее важным классом системы мониторинга является оперативный (или локальный; Павелко, 1981), позволяющий в реальном масштабе времени осуществлять контроль за состоянием окружающей среды и принимать решения при ее изменениях. В настоящее время делаются первые шаги по созданию системы оперативного мониторинга, основанного на применении аэрокосмической информации. Использование такой информации предполагает решение обратной задачи, которая для поверхностных вод суши (ПВС) формулируется следующим образом: необходимо восстановить параметры ПВС по спектрам восходящего излучения, т. е. определить функциональную связь

$$C_i = C(B_j^\uparrow),$$

где  $i$  - определяемые ингредиенты;  $j$  - спектральные каналы регистрирующей аппаратуры.

Методы решения таких задач можно разделить на теоретические, эмпирические и полуэмпирические.

Методы теоретического решения задач дистанционного зондирования достаточно подробно изучены (см., например, Шифрин, 1983). Они позволяют получать оценку величин  $C_i$  только по измерениям яркости. Однако использование этих методов предполагает создание оптической модели водного объекта и атмосферы над ним. В случае значительной пространственной неоднородности оптических свойств атмосферы и воды, а именно этими свойствами и характеризуются ПВС, в рамках теории переноса точного решения обратной задачи не найдено.

Эмпирическое решение очень трудоемко, неэкономично и при этом обладает невысокой точностью при требовании оперативности.

Наиболее практичным является полуэмпирическое решение обратной задачи, предполагающее знание вида зависимости  $C_i = C(B_j^\uparrow)k$  и экспериментального уточнения ее параметров  $k$ , к которым можно отнести: влияние атмосферы, состояние поверхности, состав и размеры минеральных частиц различного происхождения, видовой состав органических частиц и т. д.

Настоящая статья посвящена разработке методологии сбора оперативной опорной информации для решения полуэмпирических задач в процессе проведения синхронного эксперимента на ПВС.

Под опорной информацией для интерпретации дистанционных данных о качестве ПВС мы понимаем совокупность гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и других характеристик, прямо или косвенно определяющую его радиационные свойства в диапазоне длин волн дистанционного средства измерения. Состав и объем опорной информации определяют информативность аэрокосмических данных (АКД) о качестве водных объектов. Для разрабатываемых алгоритмов дешифрирования АКД оперативной опорной информации (ООИ) являются:

- суммарная концентрация взвешенных веществ,
- концентрация хлорофилла „а“,
- концентрация „желтого вещества“,
- концентрация окрашенных частиц.

Алгоритмы дешифрирования условно можно разделить на „прямой“ (Демехин и др., 1981), основанный на использовании зависимости  $C_i = C(B_j^\dagger)_k$ , и косвенный (Гительсон, Шишкин, 1983), использующий зависимость

$$C_i = C(B_j(\rho_{jk})),$$

где  $\rho_{jk}$  - коэффициент зональной яркости (КЗЯ)  $j$ -го диапазона, учитывающий параметризацию по  $k$  на момент измерений.

Из этой записи видно, что для реализации прямого алгоритма необходимо измерять  $B_j^\dagger$ , а при реализации косвенного -  $B_j^\dagger$  и  $\rho_{jk}$ . Однако такой подход возможен только в предположении отсутствия влияния атмосферы. В реальных условиях наличия атмосферы для ее учета необходимо также дополнительно определять  $C(\rho_{jk})$ . Поэтому состав спектральных измерений одинаков при реализации обоих алгоритмов, и можно говорить лишь о необходимых объемах измерений  $B$  и  $\rho$  при реализации каждого из алгоритмов.

Таким образом, состав опорной информации одинаков для обоих алгоритмов. Отличие алгоритмов зависит от необходимости иметь различные массивы данных: при прямом алгоритме -  $C(B^\dagger)$ , при косвенном -  $C(\rho)$  и  $\rho(B)$ .

Создание указанных массивов данных представляет собой отдельную крупную задачу. Отметим только, что требования к проведению экспериментов для этой цели принципиально отличны от требований к измерениям в подспутниковом эксперименте. В первом случае соблюдается синхронность каждого измерения, проводятся очень мелкомасштабные (практически точечные) измерения. Временная изменчивость полей ПВС при этом не играет роли, так как измерения радиационной ( $B$  или  $\rho$ ) и концентрационной ( $C_i$ ) величин проводятся одновременно и одномоментно. Пространственная изменчивость играет при этом положительную роль, так как необходимо провести измерения с максимальной изменчивостью изучаемых параметров.

В случае же проведения подспутникового эксперимента на первое место выступает пространственно-временная изменчи-

вость ПВС и вопрос о синхронности измерений становится основным. В этом случае необходимо осуществление в реальном масштабе времени программы поиска и исследования тестовых участков. Под тестовым участком (ТУ) понимается участок водного объекта, репрезентативный исследуемому объекту по радиационно-концентрационным зависимостям. Для ПВС невозможно указать точные географические координаты ТУ, можно лишь приблизительно указать границы контрольно-измерительного полигона (КИП), образованного системой ТУ, обеспечивающей возможность использования выбранного алгоритма дешифрования АКД и репрезентативной всему исследуемому объекту (или объектам) по гидрологическим и метеорологическим условиям. На каждом из  $n$  ТУ КИПа необходимо провести  $m$  измерений, затратив на все измерения время  $\Delta t_n$ . При этом измерение  $B_j^i$  проводится в момент времени  $t$ , который может отличаться от момента начала подспутниковых измерений на время  $\Delta t_{нс}$ .

Таким образом, несинхронность измерений предполагается *a priori* и равна  $t = \Delta t_{нс} + \Delta t_n$ . Такая постановка вопроса предполагает наличие мобильных средств сбора опорной информации и мобильного носителя этих средств.

Из литературы известны характеристики экспериментальных образцов аппаратуры, удовлетворяющих требованиям оперативности сбора опорной информации при подспутниковых экспериментах на ПВС. Это различные варианты спектрометров (или  $\rho$ -метров) (Сидько и др., 1978; Афонин, Шемшур, 1980; Велигура и др., 1981), флуориметры для экспрессного контактного определения хлорофилла (Карабашев, 1970) и лидары - для неконтактного (Фадеев, 1978), прозрачномеры для определения концентрации взвешенных веществ (Гайворонский и др., 1983). Такая аппаратура может быть установлена на борту летательного аппарата (ЛА - самолета, вертолета), при этом время измерений  $\Delta t_n$  существенно сокращается по сравнению со временем судовых исследований.

При проведении подспутникового эксперимента комплекс технических средств и методика поиска и исследования ТУ образуют подсистему сбора опорной информации. Такая подсистема должна быть максимально мобильной и обеспечить решение следующей задачи:

- выполнить поиск заданного числа  $m$  ( $m \geq 2$ ) ТУ, удовлетворяющих условиям

$$\rho_{\lambda_j}^l \neq \rho_{\lambda_j}^k \quad (\text{или } C_{ср}^l \neq C_{ср}^k), \quad (1)$$

где  $\rho_{\lambda_j}^l$  - КЗЯ  $l$ -го ТУ в  $j$ -м спектральном диапазоне;  
 $C_{ср}^l$  - средняя концентрация оптически активного ингредиента на  $l$ -м участке;

- получить среднее по площади ТУ значение  $\rho_{\lambda_j}^l$  (или  $C_{\text{ср}}^l$ ) с заданной точностью  $\delta\rho_j^l$  ( $\delta C^l$ ):

$$3\sigma_C^2 < \delta C^l; \quad (2)$$

- обеспечить заданное отличие по значениям КЗЯ (или  $C$ ):

$$\Delta^{kl} = \rho_{\lambda_i}^l - \rho_{\lambda_j}^k, \quad (\Delta'^{kl} = C_{\text{ср}}^l - C_{\text{ср}}^k); \quad (3)$$

- обеспечить отличие по значениям АКД:

$$\delta D = |D_j - D_{j+1}| \geq \Delta D, \quad (4)$$

где  $D_j$  - значение цифрового эквивалента АКД;  $\Delta D$  - задаваемая величина разрешения по  $D$ .

При этом ТУ должны обладать следующими свойствами:

- минимальным размером, который обусловлен аппаратной функцией прибора дистанционного зондирования и точностью привязки изображения к рельефу и при наличии опорных зон в лучшем случае сравним с элементом разрешения (Аванесов и др., 1981);

- однородностью по площади, что по измеряемому ингредиенту весьма существенно, так как определяет объем измерений на ТУ. Для получения среднего значения  $\rho$  (по дискретным измерениям) или  $C$  по однородному участку требуется 5-7 измерений каждого параметра, тогда как известно (Аванесов и др., 1981), что при неоднородном ТУ для получения такой же точности число измерений может достигать 120-150.

Временная изменчивость измеряемых параметров  $\Delta\rho/\Delta t_n \cdot \rho$  (или  $\Delta C/\Delta t_n \cdot C$ ) позволяет сделать заключение о возможности или невозможности использования ТУ для проведения квазисинхронного эксперимента.

Репрезентативность ТУ исследуемому объекту может рассматриваться только в совокупности измерений на ТУ, т. е. сводиться к репрезентативности КИП. Установление репрезентативности КИП возможно только при проведении большого числа синхронных измерений.

Наконец, информативность системы ТУ определяется условием (3) при дополнительном требовании

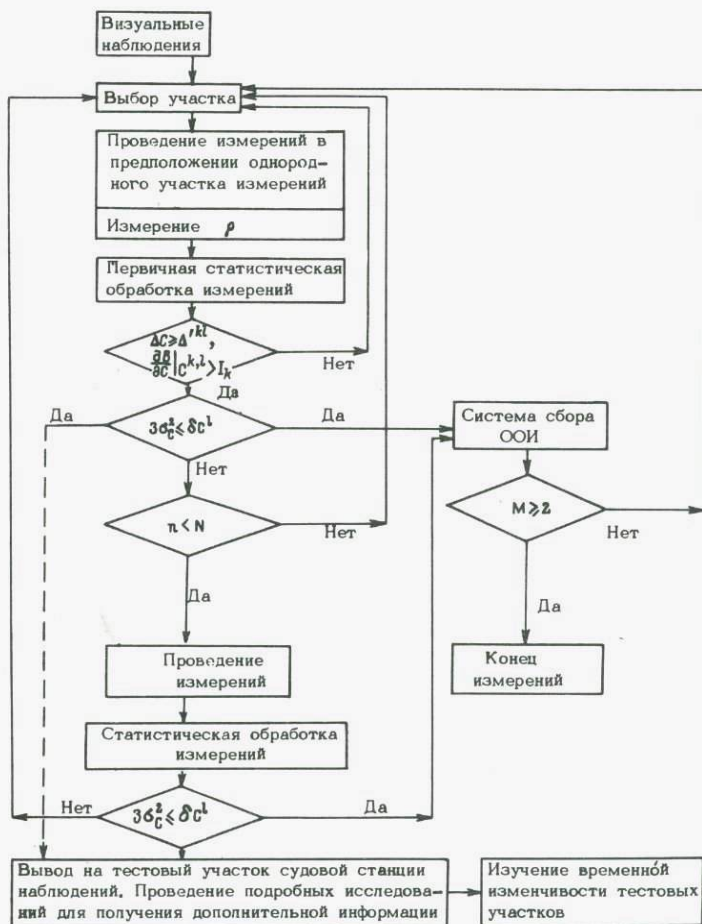
$$\left. \frac{\delta B}{\delta C} \right| C^l > I_k \left( \text{или} \left. \frac{\delta \rho}{\delta C} \right| C^l > I'_k \right), \quad (5)$$

где  $I_k$  - параметр, характеризующий наклон радиационно-концентрационной зависимости, который задается на основе зависимости банка данных.

Только весь набор этих характеристик может характеризовать ТУ и степень пригодности его для дешифрирования АКД.

Строгий подход к поиску и исследованию ТУ на КИП ПВС возможен с применением пространственного Фурье-спектрометра, однако до настоящего времени нам неизвестно о применении такой аппаратуры. В отсутствие Фурье-спектрометров необходимо производить поиск и исследование ТУ при каждом подспутниковом эксперименте. Оценка перечисленных параметров производится методом последовательного статистического анализа на борту ЛА в реальном масштабе времени.

Ниже приведена функциональная схема выбора и обследования ТУ.



Выбор ТУ начинается с визуального подбора участка с последующим проведением на нем комплекса измерений. После проведения первичной статистической обработки и проверки выполнения условий (1), (3), (5) проводится проверка условия (2):

$3\sigma_c^2 < \delta C^2$ . При выполнении этого условия данные измерений сбрасываются в систему сбора ООИ, и на этот участок при необходимости выводится судовая станция наблюдения для подробных исследований его характеристик, включая пространственно-временную изменчивость. При невыполнении условия (2) проводится оценка числа измерений, которое может понадобиться для выполнения условия (2). При превышении некоторого числа  $N$ , выбранного из соображений экономичности работ, участок признается непригодным для использования в качестве тестового. Если же при проведении  $n < N$  измерений условие (2) будет выполнено, повторяется последовательность операций по сбору ООИ и исследованию ТУ. Весь цикл измерений повторяется не менее двух раз, что определено алгоритмами дешифрирования.

Таким образом, в настоящей работе

- определен состав опорной информации, используемой для дешифрирования АКД о качестве ПВС;
- обсуждены алгоритмы выбора и поиска ТУ;
- рассмотрены проблемы образования КИП для ПВС;
- предложена схема исследования ТУ с борта ЛА.

#### Л и т е р а т у р а

- А в а н е с о в Г.А., В о в а е в В.А., В е р б и н В.Э. Выбор опорных участков автоматической координатной привязки космической видеоинформации. - Исследование Земли из космоса, 1981, № 4, с. 91-95.
- А ф о н и н Е.И., Ш е м ш у р а В.Е. Телефотометр для измерения спектральной яркости выходящего из моря излучения. - В кн.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов: Тез. докл. Таллин, 1980, с. 264.
- В е л и г у р а В.А., П о в х В.И., Ш л я х о в а Л.А. Спектральный комплекс "Вертикаль". - В кн.: Тез. докл. Всесоюз. сем. "Технические средства для Государственной системы контроля природной среды". Обнинск, 1981, ч. III, с. 191, 192.
- Г а й в о р о н с к и й Ю.Ф., Г и т е л ь с о н А.А., Д у б о в и ц к и й Г.А. и др. Спектрофотометр для дистанционных измерений гидрооптических характеристик. - В кн.: Тез. докл. Всесоюз. сем. "Технические средства для Государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП)". Обнинск, 1983, ч. II, с. 231-233.
- Г и т е л ь с о н А.А., Ш и ш к и н В.Н. Методы дешифрирования многозональной космической видеоинформации для контроля качества поверхностных вод суши. - В кн.: Тез. докл. Всесоюз. сем. "Технические средства для Государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП)". Обнинск, 1983, ч. II, с. 237-240.
- Д е м е х и н В.Ф., Л а б а з и н А.В., Л е о н т ь е в а Л.И. Возможность определения загрязняющих ве-

шеств в воде по данным дистанционных измерений яркости поверхности воды. - В кн.: Гидрохимические материалы, 1981, т. 83, с. 103-113.

Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга. - Метеорология и гидрология, 1974, № 7, с. 3-8.

Израэль Ю.А., Гасилина Н.К., Ровинский Ф.Я., Филиппова Л.М. Осуществление в СССР системы мониторинга загрязнения природной среды. Л., 1978. 116 с.

Каррабашев Г.С. К методике исследования фотолуминесценции морской воды. - Океанология, 1970, т. 10, № 5, с. 883-887.

Павелко В.Л. Классы мониторинга поверхностных вод. - В кн.: Гидрохимические материалы, 1981, т. 78, с. 3-11.

Сидько А.Ф., Филимонов В.С., Сидько Ф.Я., Рубцов И.Д. Полевой двухлучевой дифференциальный спектрофотометр. - Журн. прикл. спектроск., 1978, т. 29, № 5, с. 943-948.

Фадеев В.В. Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов. - Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 10, с. 2221-2226.

Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л., 1983. 278 с.

Г.В. Дружинин, Л.К. Егоров, А.М. Крючков,  
Л.С. Кошелев, С.Ю. Островский, Г.А. Шипчинский

#### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПРИБОРОВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРНЫХ ВОД

Автоматизированный измерительный комплекс используется на озерах как для собственно лимнологических исследований, так и для обеспечения контрольных наблюдений за характеристиками вод при выполнении многоступенчатых спутнико-самолетно-судовых комплексных экспериментов. Его конструкция является логическим развитием уже описанного измерительного комплекса (Дружинин и др., 1984), а применение современной элементной базы, разработка новой электрической схемы и конструкции прибора позволили авторам создать измерительный комплекс, обладающий рядом преимуществ. Значительно уменьшен вес и габариты прибора, повышена надежность устройства, улучшен способ обслуживания за счет введения в состав комплекса портативной коллекторной лебедки. Создано устройство для быстрой смены светофильтров в измерителе прозрачности воды. Применение печатных плат с разъемными межплатными

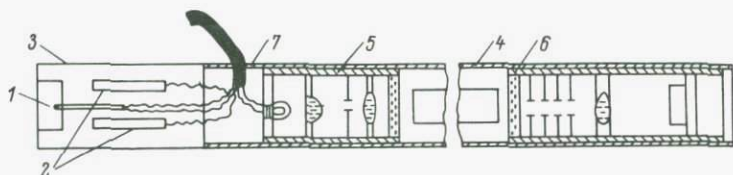


Рис. 1. Конструкция погружаемой части прибора.

1 - датчик температуры; 2 - датчик электропроводности; 3 - корпус датчиков температуры и электропроводности; 4 - дюрелевая труба; 5 - капсула осветителя; 6 - капсула фотоприемника; 7 - соединительная муфта.

соединениями позволяет быстро ремонтировать аппаратуру путем замены функциональных блоков.

Конструкция измерительного комплекса. Прибор состоит из следующих основных частей: подводного погружаемого блока, коллекторной лебедки с кабелем, надводного блока регулировки и управления, блока регистраторов.

Конструкция погружаемой части прибора показана на рис. 1. Она представляет собой блок датчиков электропроводности, температуры и прозрачности воды. Конструктивной основой блока является калиброванная труба, что позволило отказаться от применения массивного буксировочного устройства - стреловидного крыла.

Датчик температуры (1) представляет собой малоинерционное полупроводниковое устройство ММТ-54, разработанное и изготовленное в Ленинградском агрофизическом институте. Конструктивно он выполнен в виде стеклянной трубки диаметром 1,5 мм и длиной 32 мм с миниатюрным полупроводниковым термосопротивлением на конце.

Датчик электропроводности (2) - контактный, двухэлектродный. Electrodes изготовлены в виде полированных пластинок из нержавеющей стали марки 1X18H10T, для измерений подобного рода в пресных водах они почти эквивалентны платиновым.

Оба датчика - температуры и электропроводности - вмонтированы в специальный корпус (3) из органического стекла, полость которого герметизирована эпоксидной смолой. Корпус имеет цилиндрическую форму с диаметром, равным диаметру дюрелевой трубы (4), в сочленении с которой он находится.

Пластины датчика электропроводности вставлены в выфрезерованные пазы на боковой поверхности корпуса, а датчик температуры вмонтирован с торца в отверстие, высверленное по оси корпуса так, что само полупроводниковое термосопротивление имеет тепловой контакт с корпусом только через стеклян-

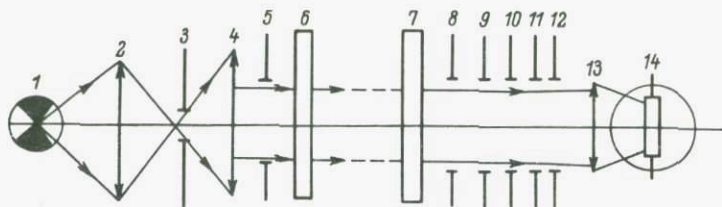


Рис. 2. Оптическая схема измерителя прозрачности воды.

1 - лампа МН 6.3 0.28; 2 - линза конденсаторная; 3, 5, 8-12 - диафрагмы; 4 - линза коллиматора; 6, 7 - иллюминаторы; 13 - проецирующая линза; 14 - фотосопротивление СФ 2-2.

ную трубку датчика ММТ-54, что практически не повышает инерционность измерителя температуры. Проточка на торце корпуса позволяет защитить датчик температуры от механических повреждений.

Измеритель прозрачности воды конструктивно выполнен из двух герметичных капсул осветителя (5) и фотоприемника (6), работающих по оптической схеме, представленной на рис. 2. Обе капсулы вставлены в дюралевую трубу и зафиксированы на расстоянии, определяемом оптической базой прибора. Такая конструкция позволяет получить хорошую соосность оптических узлов, простую и надежную для механических воздействий юстировку. Дюралевая труба имеет пазы для обеспечения удовлетворительного водообмена как при работе в режиме буксировки, так и зондирования.

В свою очередь все оптические детали закреплены на резьбовых втулках, заворачиваемых при сборке и юстировке по резьбе в корпусах капсул.

Блок датчиков прибора соединен с коллекторной лебедкой многожильным кабелем, который внутри погружаемого устройства распаивается в соединительной муфте (7).

Герметизация всех узлов погружаемой части прибора выполнена эпоксидной смолой. Это обеспечивает высокую надежность влагозащиты при работе на всех глубинах, снижает габариты и вес прибора за счет отсутствия специальных герметизирующих узлов, но делает ремонт погружаемого блока более трудоемким. Однако высокая надежность всех датчиков прибора позволила авторам выбрать именно такое решение задачи герметизации.

Несомненное удобство в работе с прибором и увеличение срока службы кабеля дает миниатюрная коллекторная лебедка, специально разработанная и изготовленная в Институте озера-ведения АН СССР для описываемого измерительного комплекса. Крепление лебедки осуществляется струбцинами, обеспечивающими ее быструю установку на борту любого судна. Вынос лебедки имеет электрический счетчик оборотов шкива для отметки глубины зондирования на регистрирующих приборах. Коллектор

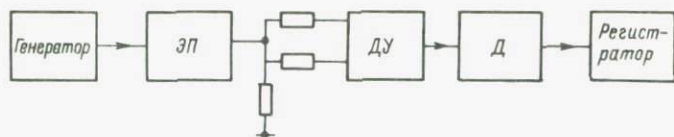


Рис. 3. Блок-схема измерителя прозрачности воды.

состоит из десяти изолированных друг от друга вращающихся шкивов, контакт с которыми осуществляется при помощи медных канатиков, пропитанных графитовым порошком. Медные канатики с одного конца натягиваются цилиндрическими пружинами, облегают шкивы и жестко закрепляются другим концом на неподвижной контактной колодке. При этом обеспечивается относительно большая площадь контакта (по сравнению с токосъемниками, имеющими плоскую контактную пружину), что обуславливает его высокую надежность и проводимость. Обслуживание лебедки заключается в ежегодной промывке контактной группы и смазке ее графитовым порошком.

Надводный блок регулировки и управления представляет собой электронное устройство, преобразующее сигналы датчиков в сигналы, пригодные для управления регистрирующими приборами. Конструктивно блок состоит из пяти печатных плат, устанавливаемых в разъемную колодку и являющихся отдельными функциональными устройствами.

**Электронная схема комплекса.** Питание электронной схемы осуществляется от любого источника стабилизированного напряжения 15 В. Блок-схема измерителя прозрачности воды показана на рис. 3. В качестве фоточувствительного элемента схемы применен фоторезистор СФ 2-2, который питается от генератора прямоугольных импульсов (ГПИ) частотой 10 кГц, что позволяет отказаться от применения усилителей постоянного тока, обладающих значительным дрейфом нуля. Сигнал прямоугольной формы, пройдя эмиттерный повторитель (ЭП), поступает на фоточувствительный элемент и делитель опорного напряжения, с которым сравнивается напряжение на фоторезисторе в дифференциальном усилителе (ДУ). Разностный выходной сигнал дифференциального усилителя выпрямляется детектором (Д) и поступает на вход регистрирующего прибора КСП-4. Большой запас чувствительности измерителя прозрачности воды позволяет растянуть любой интересующий наблюдателя участок шкалы в десять раз. Питание лампы и всех элементов схемы осуществляется при помощи параметрического стабилизатора напряжения.

Принципиальная электрическая схема электротермометра представляет собой неуравновешенный мост (рис. 4). Питание его осуществляется от сухого элемента 373, который может работать без замены 3-4 месяца. Диапазон измерений 0-25 °С может быть перестроен с сохранением линейности шкалы при условии, что он не будет расширен. Точность электротермометра 0,1 °С. Настройка и

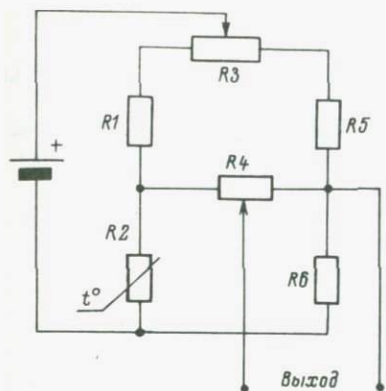


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема измерителя температуры.

тарировка прибора аналогичны тарировке электротермометра, описанного в 1984 г. (Дружинин и др., 1984).

Блок-схема измерителя удельной электропроводности воды представлена на рис. 5. Измерение производится по принципу оценки тока через измерительную ячейку (датчик). При условии постоянства выходного напряжения генератора ток, проходящий

через датчик, будет пропорционален удельной электропроводности. Для уменьшения влияния эффекта поляризации на контактах датчика в схеме используется генератор сигналов синусоидальной формы с частотой 1030 Гц. Чтобы устранить влияние корпуса судна в качестве гальванической развязки применяются трансформаторы Тр1 и Тр2, причем трансформатор Тр1 является трансформатором тока. Сигнал со вторичной обмотки трансформатора Тр2 усиливается, выпрямляется детектором и подается на регистратор. Напряжение на входе регистратора пропорционально току, прошедшему через датчик, а соответственно и удельной электропроводности воды.

В качестве регистратора применяется двухперьевой самописец КСП-4 со встроенным нелинейным элементом для компенсации температурной поправки, аналогично уже описанному кондуктометру (Дружинин и др., 1984).

Измеритель удельной электропроводности работает в двух диапазонах — 70–90 и 50–150 мкСм/см<sup>2</sup> — с точностью 3,5%.

Дальнейшее совершенствование измерительного комплекса предполагает включение в его состав малоинерционного оксиметра. Разработано также устройство ввода всех измеряемых параметров в плату аналого-цифровых преобразователей ЭВМ „Искра-12-56“, однако применение этой ЭВМ резко повысит вес и габариты комплекса, а также требования его к электропитанию.

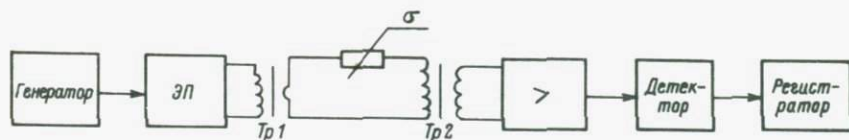


Рис. 5. Блок-схема измерителя удельной электропроводности воды.

Д р у ж и н и н Г.В., И в а н о в В.М., К о р о т к е в и ч О.Е.,  
К р ю ч к о в А.М., Р у м я н ц е в В.Б., Ш и п ч и н -  
с к и й Г.А. Комплекс дистанционной аппаратуры для экспресс-  
методов гидрологических наблюдений на внутриконтинентальных  
водоемах. - Водные ресурсы, 1984, № 3, с. 147-154.

Г.В. Дружинин, Л.К. Егоров, М.А. Стучевский

## СУДОВЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Надежность интерпретации данных дистанционных съемок во многом зависит от наземных методов наблюдений, которые используются в качестве основы для контроля дистанционных измерений. В свою очередь внедрение дистанционных методов в озероведение предъявляет существующим методам судовых наблюдений два основных требования - они должны обеспечивать высокую информативность и оперативность наблюдений на акватории озера.

Под информативностью в данном случае подразумевается возможно больший набор характеристик-индикаторов качества вод, определяемых судовыми методами. Это требование обусловлено тем, что большинство дистанционных методик сейчас находится в стадии поисковых разработок, а больший набор индикаторов открывает широкие возможности для качественной интерпретации сигналов, получаемых дистанционно.

Под оперативностью и обзорностью понимается способность охвата наблюдениями возможно большей акватории за короткий промежуток времени. Это требование обусловлено высокой оперативностью самих дистанционных методов, которые дают информацию о состоянии вод по всей акватории озера, практически не искаженную во времени. Следовательно, достоверность интерпретации дистанционных съемок находится в прямой зависимости от оперативности методов контроля.

В настоящее время лимнологические исследования выполняются двумя основными методами; методом проб и экспресс-методом.

1. М е т о д п р о б. Включает отбор пробы в данной точке акватории и последующую ее обработку в полевых или лабораторных условиях. Методом проб сейчас определяется подавляющее большинство характеристик качества озерных вод, отсюда его высокая информативность. Необходимость дополнительных затрат времени на лабораторную обработку и анализ объясняет малую оперативность метода проб, а редкая сеть станций отбора проб - его невысокую обзорность.

2. Э к с п р е с с - м е т о д. В этом случае датчики приборов буксируются в поверхностном слое воды и одновременно идет регистрация (непрерывная или дискретная) измерений. Экспресс-ме-

тодами сейчас определяется ограниченное число характеристик: температура воды, электропроводность, прозрачность и количество растворенного кислорода, отсюда – малая информативность метода. Отсутствие промежуточных этапов обработки данных и возможность измерений на ходу судна объясняют высокую оперативность и обзорность экспресс-метода (Дружинин и др., 1984а).

Если считать, что информативность есть положительное свойство метода проб, а оперативность – положительное свойство экспресс-метода, то общая задача сводится к разработке компромиссного метода, в котором объединялись бы достоинства и по возможности исключались бы недостатки обоих методов. Практически это выразится в поиске возможностей перехода от измерений характеристик в пробах к измерениям *in situ*, а в тех случаях, когда это невозможно, – в поиске способов сокращения времени общего определения отдельных характеристик путем автоматизации промежуточных операций: отбора проб, первичной обработки и анализа.

Из множества частных методик, используемых в методе проб, некоторые по своему физическому содержанию могут быть сведены к измерениям методов *in situ* и, следовательно, автоматизированы. Ниже приведены методы, используемые для автоматизации анализа поверхностных вод (Справочник ..., 1980).

## Методы

## Определяемые характеристики

### Электрохимические

Потенциометрия	pH, $E_h$ , $Cl^-$ , $F^-$ , $Na^+$ , $NO_3^-$ , $S^{2-}$
Кулонометрия (кулонометрическое титрование)	$NH_4^+$ , $N_{общ}$ , As, Se, Sb, V, $Cl^-$ , органические соединения
Кондуктометрия (кондуктометрическое титрование)	Удельная электропроводность, общая минерализация, отдельные ионы ( $SO_4^{2-}$ )
Полярография (хроно-потенциометрия)	Cd, Pb, Cu, Sb, Bi, As, $O_2$ (первичная продукция, деструкция, БПК), органические вещества (пестициды, фенолы)

### Спектрометрические

Фотоколориметрия	Главные ионы – $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Cl^-$ , $SO_4^{2-}$ , биогенные вещества – $NH_4^+$ , $NO_2^-$ , $NO_3^-$ , $PO_4^{3-}$ , Si, тяжелые металлы – $Cu^{2+}$ , $Cr^{6+}$ , $Fe^{2+}$ , $Zn^{2+}$ , фенолы, ХПК
УФ-спектрофотометрия	Общий органический углерод
ИК-спектрофотометрия	Органические вещества (лигнин, нефтепродукты)
Люминесценция (флуоресценция)	Органические вещества (гумусные вещества, хлорофилл и продукты его распада, нефтепродукты), канцероген-

Атомная абсорбция	ные вещества (3, 4 - бензпирены). Тяжелые металлы - Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Cd, Bi, Hg, щелочные и щелочноземельные
Рентген-спектроскопия	Металлы - As, Se, Te, B

#### Х р о м а т о г р а ф и ч е с к и е

Газожидкостная хроматография	Органические вещества (пестициды, углеводороды, органические кислоты, амины)
------------------------------	--

#### К о м б и н и р о в а н н ы е

Хроматомасс-спектрометрия	Органические вещества, нефтепродукты
Газовая хроматография	Общий органический углерод
Фитохимические + УФ- и ИК-фотокolorиметрия	Общий органический фосфор, общий органический азот

Работами Быстровой и др. (1979) и Страдомского (1979) показана возможность использования в автоматизированном режиме ионселективных электродов для определения ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{S}^{2-}$  и др. Очень перспективны в этом отношении спектрофотометрические методики, на основе которых разработан ряд автоанализаторов для определения главных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), минеральных форм азота ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ),  $\text{PO}_4^{3-}$ , силикатов, общего азота и фосфора, тяжелых металлов, фенолов, фторидов, цианидов, ХПК (Справочник ..., 1980), а также  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  (Autoanalyzer...). Установлена возможность использования полярографических методик для автоматизированного определения большого числа металлов (Pb, Cd, Cu, Hg, Sb, Bi, Zn), неметаллов (As, Te и др.), растворенных газов ( $\text{O}_2$ ) и органических веществ (Справочник ..., 1980). Существует также ряд автоматизированных способов определения органических веществ на основе измерений светопоглощения в УФ-области. Исследования (Назарова, Страдомский, 1977; Назарова и др., 1975) показали, что светопоглощение может быть непосредственно связано с содержанием общего растворенного углерода. Однако чувствительность многих методик невелика, что позволяет определять характеристики вод только при высоких концентрациях элементов.

Тем не менее на основе перечисленных методик уже создан ряд автоматических станций контроля (АСК) качества природных вод (Быстрова и др., 1979; Минина и др., 1979; Руководство ..., 1977; Справочник ..., 1980; Спектрофлуориметр ..., 1975; Autoanalyzer...). Эти станции представляют собой сложные многофункциональные комплексы, часто имеющие такие габариты и массу, что могут быть смонтированы только в стационарных условиях. В настоящее время на основе внедрения электронных систем и миниатюризации узлов разрабатываются передвижные АСК.

Технические характеристики приборов для контроля качества воды

Класс прибора	Название и тип прибора	Назначение	Предел измерений
Мутномеры	Автоматический анализатор мутности воды АМС-У	Непрерывный контроль мутности	0-4,5 мг/л
	Фототиндалеметрический мутномер АОВ-9	Циклический контроль мутности	0-4; 0-8; 0-200 мг/л
	Фототиндалемер лабораторный АОВ-9Л	Периодический контроль мутности	0-5; 0,25; 0-50; 0-100 мг/л
	Автоматический турбидиметр для воды ТВ-346	Непрерывный контроль мутности	0-3; 0-10; 0-20; 0-500 мг/л
	Переносной автоматический мутномер М-101	Непрерывный и периодический контроль мутности	По КФГ пропускания от 10 до 100%
	Фотоэлектрические лоточные ультрамикроскопы ФПУ-1 и ФПУ-2	Периодический подсчет количества взвешенных частиц	0,01-4 мг/л
Цветомеры	Автоматический анализатор мутности и цветности АМЦ	Непрерывный контроль мутности и цветности	0-3,5 мг/л 0-30 град.
	Спектрофотометр для определения цветности АОВ-10	Непрерывный контроль цветности фильтрованной воды	0-150 град.
	Абсорбциометр для измерения цветности ЦВ-201		0-100 град. (при мутности до 10 мг/л)
Прочие приборы	Регистрирующий рН-метр с суммарным электродом АОВ-5	Непрерывный контроль рН в помещениях с повышенной влажностью	2-5; 5-8
	Прибор для определения щелочности и рН АОВ-11	Циклический контроль щелочности и рН	0-5-10 мг-экв/л 2-12
	Прибор для определения карбонатной окисляемости АОВ-6	Циклический контроль карбонатной агрессивности	Индекс стабильности 0-05
	Анализатор содержания фтора АФ-297	Циклический контроль концентрации фтора	0-1,5 мг/л
	Автоматический титромер дискретного действия фотометрический ТАД-1Ф-01	Циклический контроль щелочности	0-6 мг-экв/л

Для лимнологических исследований, в том числе и для обеспечения аэрокосмических наблюдений над озерами, необходима разработка АСК, носителем которой могло бы являться научно-исследовательское судно. В этом случае в первую очередь целесообразно рассмотреть отдельные и наиболее надежные узлы, используемые в существующих АСК, с целью их адаптации к

Габаритные размеры, мм	Вторичный прибор	Изготовитель
910 x 336 x 450	Электронный мост	Завод „Моснефтекип“
535 x 480 x 420	Милливольтметр и потенциометр	Опытное производство ИКХХВ АН УССР
260 x 400 x 340	Милливольтметр	
1800 x 900 x 4500	Электронный мост	
Датчик проточный 260 x 140 x 130 Датчик погружной 250 x 60 x 250 Измерительный блок 270 x 145 x 220	Потенциометр	Опытный завод СКБ АП
Датчик 500 x 386 x 105. Блок усиления 560 x 270 x 310. Блок пробоподготовки 326 x 285 x 180	Потенциометр	
910 x 336 x 450	Электронный мост	Завод „Моснефтекип“
1700 x 500 x 700	Милливольтметр или электронный мост	Опытное производство ИКХХВ АН УССР
1800 x 900 x 500	Электронный мост	Опытный завод СКБ АП
33 x 210 x 130	Потенциометр	Опытное производство ИКХХВ АН УССР
1775 x 720 x 600		
1775 x 720 x 600		
Измерительный блок 1800 x 800 x 450		
Блок гитрования 1600x800x400		Опытный завод СКБ АП

судовым условиям. Эти узлы представляют собой три группы малогабаритных приборов (мутномеры, цветомеры и кулонмеры; таблица), которые могут устанавливаться на судах.

Большой интерес в этом отношении представляет АСК „Наяда“ (Автоматическая станция ..., 1981), выпускаемая в ЧССР, позволяющая определить 12 характеристик: рН, окислительно-

восстановительный потенциал, электропроводность, температуру воды и воздуха, растворенный кислород, коэффициент УФ-излучения, мутность, содержание хлора, давление и радиацию. Габариты и масса АСК (350 кг) позволяют использовать ее на научно-исследовательских судах.

Поскольку большинство частных методик метода проб имеют в своей основе обработку и анализ только единичных проб воды, важной задачей является автоматизация операции отбора проб и их первичной обработки (фильтрация, консервация). Для этого целесообразно снабжать научно-исследовательские суда проточными устройствами, обеспечивающими непрерывный забор воды из поверхностного слоя (0,2–0,5 м), ее свободное прохождение в камере датчиков и сброс за борт. Такая конструкция должна быть оборудована приспособлениями для установки датчиков характеристик, используемых в экспресс-методах:  $t$ ,  $\sigma$ ,  $\theta$ ,  $O_2$  (Дружинин, 1984б), для установки датчиков тех характеристик, которые предположительно можно перевести в режим измерений *in situ* (некоторые ионселективные датчики, например,  $pH$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $Na^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $S^{2-}$ ), для отбора точно дозированных проб воды на ходу судна, а также для фильтрации точно дозированных проб воды на ходу судна.

Установка такой конструкции на судне, во-первых, открывает путь к последовательной проверке возможностей перевода отдельных характеристик из метода проб в режим *in situ*, что ведет к увеличению информативности экспресс-метода, не уменьшая его оперативности, и, во-вторых, открывается широкая возможность для массовых анализов гидрооптических характеристик воды, что является самым существенным для обеспечения аэрокосмических экспериментов.

Первый опыт использования подобной проточной системы „Aquamer“, установленной на маломерном судне „Бит“ и работавшей в 1983 г. на Ладожском озере, показал ее преимущества перед буксируемыми измерительными системами.

#### Л и т е р а т у р а

- А в т о м а т и ч е с к а я станция контроля качества воды. — Проспект фирмы ЧССР „Наяда“. 1981. 4 с
- Б ы с т р о в а Л.Ф., С т р а д о м с к и й В.Б., Н а з а р о в а А.А. Использование ионселективных электродов для определения ионов в качестве датчиков автоматических станций контроля химического состава поверхностных вод. — В кн.: Гидрохимические материалы, Л., 1979, т. 23. 34 с.
- Д р у ж и н и н Г.В., И в а н о в В.М., К о р о т к е в и ч О.Е., К р ю ч к о в А.М., Ш и п ч и н с к и й Г.А. Комплекс дистанционной аппаратуры для экспресс-методов гидрологических наблюдений на внутриконтинентальных водоемах. — Водные ресурсы, 1984 а, № 3, с. 147–154.

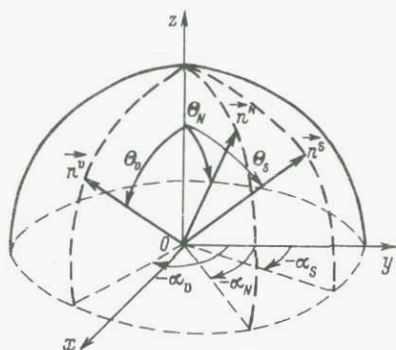
- Д р у ж и н и н Г.В., К о р о т к е в и ч О.Е., Р у -  
м я н ц е в В.Б. Экспресс-метод полевых наблюдений за  
распространением сточных вод в озерах. - Водные ресурсы,  
1984 б, № 2, с. 150-161.
- М и н и н а Л.И., С т р а д о м с к и й В.Б., Н а з а -  
р о в А.А. Автоматизация колориметрических методов для  
контроля показателей химического состава природных вод. -  
В кн.: Гидрохимические материалы, Л., 1979, т. 23, 62 с.
- Н а з а р о в а А.А., С т р а д о м с к и й В.Б. Примене-  
ние УФ-спектрокопии для оценки содержания органических  
веществ в поверхностных водах. - В кн.: Второе Всесоюз.  
совещ. по анализу природных и сточных вод: Тез. докл. М.,  
1977, с. 18, 19.
- Н а з а р о в а А.А., С т р а д о м с к и й В.Б., Т е -  
л е г и н а Л.Н. Спектрофотометрический метод определе-  
ния общего содержания органического углерода в природных  
водах. - В кн.: Мат-лы Всесоюз. научно-техн. совещ.  
„Аналитическое приборостроение. Методы и приборы для  
анализа жидких сред“. Тбилиси, 1975, т. 1, ч. 2, с. 116-129.
- Р у к о в о д с т в о по химическому анализу поверхностных  
вод суши: Определение нефтепродуктов в воде. Л., 1977. 80 с.
- С п е к т р о ф л о р и м е т р „Нева-01“. - В кн.: Мат-лы  
Всесоюз. научно-техн. совещ. „Аналитическое приборостроение.  
Методы и приборы для анализа жидких сред“. Тбилиси, 1975, т. 1,  
ч. 2, с. 29-35.
- С п р а в о ч н и к по свойствам, методам анализа и очистки  
воды / Ред. А.П. Пилипенко. Киев, 1980, ч. 1 и 2. 1042 с.
- С т р а д о м с к и й В.Б. Методические основы автоматиза-  
ции контроля химического состава поверхностных вод. -  
В кн.: Гидрохимические материалы. Л., 1979, т. 23, с. 22-38.
- A u t o a n a l y z e r II System, Monitor IY Sys-  
tem. - Technicon Instruments for Water Quality Ana-  
lysis. USA.

В.И. Повх, Г.В. Фомин (Новочеркасское ВВУС)

#### ВЕРОЯТНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ БЛИКОВ СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИБОРОМ

Регистрируемое спектральным прибором (СП) восходящее над взволнованной водной поверхностью излучение содержит блики, т. е. зеркально отраженную прямую солнечную радиацию. Вероятность попадания блика в СП зависит от параметров волнения, параметров прибора, геометрии эксперимента. Как правило, методика эксперимента строится таким образом, чтобы исключить попадание бликов в СП, так как их интенсивность значительно превосходит интенсивность других компонент восходящего излучения, хотя и несет достаточную информацию о

Рис. 1. Схема векторов относительного прибора.



составе поверхностного слоя водной толщи. Детальное изучение вклада бликовой составляющей позволит выработать методики регистрации восходящего излучения с контролируемым учетом этого вклада.

Поверхность воды при наличии волнения будем рассматривать как совокупность достаточно малых площадок, нормаль к которым произвольно ориентирована в пространстве. Воспользуемся функцией распределения, предложенной Коксом и Манком (Cox, Munk, 1956) на основе экспериментальных данных, полученных фотоспособом:

$$f(\alpha_N, \theta_N) = \frac{K \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi + \eta^2)\right\}}{2\pi\sigma_x\sigma_y \cos^3 \theta_N},$$

$$\xi = \sigma_x^{-1} \sin(\alpha_N - \alpha_w) \operatorname{tg} \theta_N,$$

$$\eta = \sigma_y^{-1} \cos(\alpha_N - \alpha_w) \operatorname{tg} \theta_N, \quad (1)$$

$$K = 1 - \frac{c_{21}}{2}(\xi^2 - 1) - \frac{\cos}{6}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{c_{40}}{24}(\xi^4 - 6\xi + 3) + \frac{c_{22}}{4}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) \dots,$$

где  $\alpha_w$  - азимутальный угол направления ветра; численные значения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $K$  можно найти в работе (Guinn et al., 1979);  $\alpha_N$  и  $\theta_N$  - азимутальный и зенитный углы вектора нормали  $\vec{n}^N(\alpha_N, \theta_N)$  к площадке на поверхности воды. Для расчета вероятности попадания отраженной прямой солнечной радиации в прибор, направление на который определяется единичным вектором  $\vec{n}^V(\alpha_V, \theta_V)$ , с направления, определяемого единичным вектором  $\vec{n}^S(\alpha_S, \theta_S)$  (рис. 1), выражение (1) необходимо дополнить законом Снеллиуса и условием единичности вектора  $\vec{n}^N(\alpha_N, \theta_N)$ :

$$\begin{aligned} \vec{n}^N [\vec{n}^V \vec{n}^S] &= 0, \\ (\vec{n}^N \vec{n}^V) &= (\vec{n}^N \vec{n}^S), \\ |\vec{n}^N|^2 &= 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Составленная на основании уравнения (2) система позволяет получить для углов  $\alpha_N$  и  $\Theta_N$  соотношения, связывающие их с углами  $\alpha_V, \Theta_V$  и  $\alpha_S, \Theta_S$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_N &= D_2/D_1, \\ \cos \Theta_N &= \left\{ 1 + (D_1/D)^2 + (D_2/D)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $D, D_1$  и  $D_2$  - определители:

$$D = \begin{vmatrix} A & B \\ K & L \end{vmatrix}, \quad D_1 = \begin{vmatrix} B & C \\ L & N \end{vmatrix}, \quad D_2 = \begin{vmatrix} C & A \\ L & K \end{vmatrix}.$$

Элементы определителей задаются следующим образом:

$$A = (n_{\gamma}^V n_z^S - n_z^V n_{\gamma}^S),$$

$$B = (n_z^V n_x^S - n_x^V n_z^S),$$

$$C = (n_x^V n_{\gamma}^S - n_{\gamma}^V n_x^S),$$

$$K = (n_x^V - n_x^S),$$

$$L = (n_V^V - n_V^S),$$

$$N = (n_z^V - n_z^S).$$

Угол  $\alpha_N$  определяется неоднозначно, для его доопределения необходимо использовать информацию о знаках определителей, а именно:

$$\alpha_N = \begin{cases} \arctg(D_2/D_1), & \text{если } (D_1/D) > 0, (D_2/D) > 0, \\ \arctg(D_2/D_1) + \pi, & \text{если } (D_1/D) < 0, \\ \arctg(D_2/D_1) + 2\pi, & \text{если } (D_1/D) > 0, (D_2/D) < 0. \end{cases}$$

Угол  $\Theta_N$  определяется однозначно, так как интервал его изменений  $(0, \pi/2)$ .

Полная вероятность попадания бликов от всей наблюдаемой взволнованной водной поверхности в СП с углом зрения  $2\beta$  будет определяться выражением

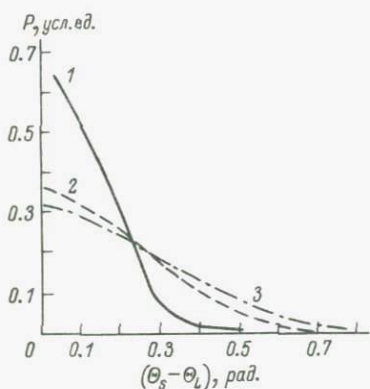


Рис. 2. Зависимость попадания бликов в СП от разности углов  $(\Theta_S - \Theta_L)$ , разных скоростей ветра и угла зрения  $2\beta = 0,21$  рад. Цифры у кривых - скорости ветра, м/с.

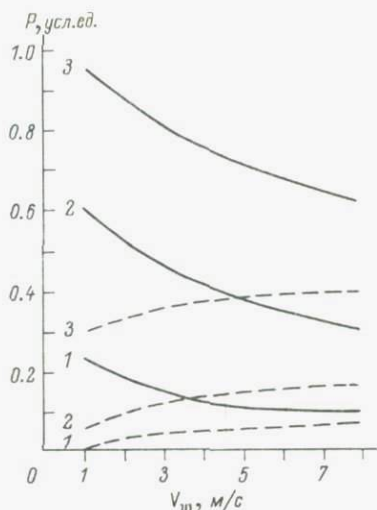


Рис. 3. Зависимость вероятности попадания бликов в СП от скорости ветра для различных углов зрения.

Углы зрения: 1 - 0,07 рад., 2 - 0,21 рад, 3 - 0,49. Сплошная линия -  $(\Theta_S - \Theta_L) = 9$  рад, пунктирная -  $(\Theta_S - \Theta_L) = 0,3$  рад.

$$P(2\beta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\beta f \left\{ \alpha_N(\alpha_V, \Theta_V), \Theta_N(\alpha_V, \Theta_V) \right\} \frac{\delta(\alpha_N, \Theta_N)}{\delta(\alpha_V, \Theta_V)} d\alpha_V d\Theta_V. \quad (4)$$

Здесь  $\delta(\alpha_N, \Theta_N) / \delta(\alpha_V, \Theta_V)$  - якобиан перехода от переменных  $\alpha_N, \Theta_N$  к переменным  $\alpha_V, \Theta_V$ . Координаты вектора  $\vec{n}^S(\alpha_S, \Theta_S)$  задаются однозначно. Если объектив направлен не по вертикали, а под некоторым углом  $\Theta_L$  к ней с азимутальным углом  $\alpha_L$ , то область интегрирования уравнения (4) будет эллипс с большой полуосью вдоль направления  $\alpha_L$  и малой, ему перпендикулярной. Интервал изменения  $\Theta_V$  при этом будет зависеть от  $\Theta_L, \alpha_L$  и для каждого значения  $\alpha_V$  будет свой.

$\sigma_x$  и  $\sigma_Y$  в формулах (1) определим следующим образом:

$$\sigma_x^2 = 0.003 + 1.92 \cdot 10^{-3} V_w,$$

$$\sigma_Y^2 = 3.16 \cdot 10^{-3} V_w,$$

где  $V_w$  - скорость ветра в метрах в секунду.

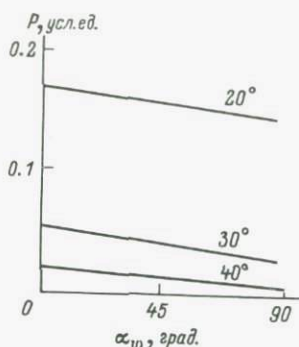


Рис. 4. Зависимость попадания бликов в СП от азимутального угла направления ветра для скорости ветра 7 м/с и зенитных углов Солнца.

Цифры у кривых – зенитные углы Солнца.

Примем функцию распределения  $f(\Theta_N)$  взволнованной водной поверхности в упрощенном виде, проинтегрированную по азимуту (Schau, 1978):

$$f(\Theta_N) \approx C \exp \left\{ -\frac{\operatorname{tg}^2 \Theta_N}{4} \left( \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right\}, \quad (5)$$

где  $C$  – определяется из условия нормировки. В этом случае вероятность попадания блика в объектив СП будет зависеть только от разности углов  $(\Theta_S - \Theta_L)$ . На рис. 2 приведена зависимость вероятности попадания блика как функция  $(\Theta_S - \Theta_L)$  для угла зрения  $2\beta = 0.21$  рад. и скоростей ветра 1, 5 и 8 м/с. Необходимо отметить наличие некоторого интервала значений  $(\Theta_S - \Theta_L)$  в районе 0.22–0.24 рад., где зависимость вероятности от величины скорости ветра минимальна. Вычисления для углов зрения  $2\beta$  0.07 рад. и 0.49 рад. дают соответственно значения этого интервала 0.21–0.23 рад. и 0.25–0.3 рад. Результаты вычислений зависимости вероятности от скорости ветра для углов зрения 0.07, 0.21, 0.49 рад. и двух значений  $(\Theta_S - \Theta_L)$  0 и 0.6 рад. показаны на рис. 3. Графики зависимости вероятности от величины скорости ветра показывают, что для угла  $(\Theta_S - \Theta_L) = 0$  вероятность уменьшается с ростом скорости ветра, а для  $(\Theta_S - \Theta_L) = 0.3$  она увеличивается.

Упрощенная функция распределения (5) не позволяет оценить влияние направления ветра. В связи с этим был проведен расчет с использованием функции распределения (1), где для упрощения параметр  $K$  был принят равным единице, а угол  $\Theta_i$  равным 0. Рассчитанные зависимости для углов зрения  $2\beta$ , равных 20, 30 и 40°, показаны на рис. 4.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- существует некоторый оптимальный интервал значений для разности углов  $(\Theta_S - \Theta_L)_{\text{опт}}$  в районе 0.2–0.3 рад., в котором вероятность попадания бликов в СП слабо зависит от скорости ветра для любых углов зрения СП;

- с ростом угла зрения СП вероятность попадания бликов возрастает;

- увеличение скорости ветра приводит к уменьшению вероятности для углов  $(\Theta_S - \Theta_L) < (\Theta_S - \Theta_L)_{\text{опт}}$  и к росту вероятности для углов  $(\Theta_S - \Theta_L) > (\Theta_S - \Theta_L)_{\text{опт}}$ , а также к сглаживанию

ванию функциональной зависимости  $P = P(2\beta)$ , которая при значительных скоростях ветра становится почти линейной; - влиянием направления ветра, определяемого азимутальным углом  $\alpha_{\text{в}}$ , можно пренебрегать.

#### Л и т е р а т у р а

- С о х С., М u n k W. Slopes of the sea surface deduced from photograph of the sun glitter. - *Bul. Scr. Inst. Oceanogr.*, 1956, vol. 6, N 2, p. 401-406.
- G u i n n J.A., P l a s s G.N., K a t t a w a r O.W. Sunlight glitter on wind-ruffled sea; further studies. - *Appl. Opt.*, 1979, vol. 18, N 1, p. 842-849.
- S c h a u H.C. Measurement of capillary wave slope on the ocean. - *Appl. Opt.*, 1978, vol. 17, N 1, p. 26-34.

В.С. Тарасов, А.Е. Вишневский, В.С. Тutyгин,  
В.В. Заварюхин, А.А. Поделинская (ЛПИ)

#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЭВМ

В настоящее время все более широкое развитие получают системы дистанционного исследования подстилающей поверхности, основанные на применении сканирующей аппаратуры. Количество информации, получаемой за один сеанс измерений, чрезвычайно велико. В Ленинградском политехническом институте им. М.И. Калинина разработана автоматизированная система, производящая ввод в ЭВМ информации с датчиков и ее обработку (Вишневский, Тарасов и др., 1982). В данной работе рассматривается методика обработки информации на различных вычислительных машинах с использованием методов регрессионного анализа и планирования эксперимента (Вишневский, Тарасов, 1983).

Температура подстилающей поверхности является функцией двух независимых переменных: координаты по строке сканирования  $x_1$  и по столбцу  $x_2$ .

В произвольной точке температура определяется по уравнению регрессии

$$T_i(x_1, x_2) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_{12} x_{1i} x_{2i} + \dots + \epsilon_i. \quad (1)$$

Коэффициенты регрессии можно определить, используя метод наименьших квадратов. Тогда будет получено наилучшее приближение к экспериментальным данным.

Величина исследуемого фрагмента может иметь произвольные размеры. Начало координат выбирается в центре фрагмента.

Тогда план эксперимента получается симметричным и ортогональным, а безразмерные величины факторов  $x_1$  и  $x_2$  изменяются в пределах  $\pm 1$ .

Коэффициенты регрессии определяются из соотношений

$$\alpha_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\partial i} (x_1, x_2), \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N x_{i1}^2} \sum_{i=1}^N x_{i1} T_{\partial i}, \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N x_{i2}^2} \sum_{i=1}^N x_{i2} T_{\partial i}, \quad (4)$$

$$\alpha_{12} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (x_{i1} x_{i2})^2} \sum_{i=1}^N x_{i1} \cdot x_{i2} \cdot T_{\partial i}. \quad (5)$$

Здесь  $N$  - число измерений во фрагменте;  $T_{\partial i}$  - экспериментальное значение температуры.

Уравнения изотерм получаются из (1) и имеют вид

$$x_1 = \frac{T_i(x_1, x_2) - \alpha_0 - \alpha_2 x_2}{\alpha_1 + \alpha_{12} x_2}, \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{T_i(x_1, x_2) - \alpha_0 - \alpha_1 x_1}{\alpha_1 + \alpha_{12} x_2}.$$

Для выбранной величины температуры  $T_i(x_1, x_2)$  задаются значения одного из факторов и по формуле (6) определяются значения другого фактора, при котором  $T = T_i$ . По вычисленным значениям  $x_1$  и  $x_2$  строятся изотермы в данном фрагменте.

Для вычисления градиентов температур используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} G_{x_1} &= \frac{\partial T}{\partial x_1} = \alpha_1 + \alpha_{12} x_2, \\ G_{x_2} &= \frac{\partial T}{\partial x_2} = \alpha_2 + \alpha_{12} x_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$G = \sqrt{G_{x_1}^2 + G_{x_2}^2} . \quad (7)$$

Линии равного градиента температур  $G_i$  определяются по формуле

$$x_i = \frac{\sqrt{G_i^2 - (\alpha_1 + \alpha_2 x_2) - \alpha_2}}{\alpha_{12}} , \quad (8)$$

$$G_i \geq \alpha_1 + \alpha_2 x_2 .$$

Достоинство изложенной методики заключается в том, что полученная поверхность регрессии дает наилучшее приближение к экспериментальным данным в выбранном фрагменте. Однако в изотермах, находящихся в разных фрагментах, на границах наблюдаются разрывы, так как информация для различных участков температурного поля обрабатывается независимо.

Разрывы в изотермах устраняются следующим образом. На первом этапе получают усредненные значения температур в центрах малых фрагментов, используя экспериментальные данные и формулу (2). На втором этапе через каждые четыре точки проводят поверхность регрессии и определяют коэффициенты уравнения (1):

$$\alpha_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_{zi} , \quad \alpha_1 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_1 T_{zi} , \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_2 T_{zi} , \quad \alpha_{12} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_1 x_2 T_{zi} .$$

Затем производится расчет и построение изотерм и их отображение на графопостроителе или графическом дисплее. Разрывы в изотермах отсутствуют, так как поверхность регрессии следующего фрагмента проходит через две точки предыдущего.

Для опробования описанной методики был составлен комплекс программ, в который вошли:

- программа выбора исследуемого фрагмента из массива спутниковой информации;
- программа расчета коэффициентов регрессии и координат изотерм;
- программа построения изотерм на печатающем устройстве.

Все программы реализованы на стандартном языке ФОРТРАН, что позволяет ориентироваться в работе на любую универсальную ЭВМ. С помощью комплекса программ проводились исследования по выбору оптимального размера фрагмента путем по-

строения регрессионной модели первого порядка с учетом слагаемого  $\alpha_{12} x_1 x_2$ , определяющего взаимодействие факторов  $x_1$  и  $x_2$ .

Увеличение размеров фрагмента при сохранении числа коэффициентов регрессии ведет к возрастанию погрешности аппроксимации за счет повышения степени усреднения. Однако в смысле статистической обеспеченности погрешность уменьшается с увеличением числа точек, по которым рассчитываются коэффициенты регрессии. Для полей температуры, полученных дистанционными методами, этот фактор особенно важен в силу заметных изменений оценок математического ожидания и дисперсии в пространстве.

Для оценки точности аппроксимации введем следующие допущения:

-  $\epsilon_i$  в модели (1) есть случайная величина, причем

$$M(\epsilon_i) = 0, \quad D(\epsilon_i) = \sigma^2,$$

где  $\sigma^2$  - неизвестная величина дисперсии;  $\epsilon$  некоррелированы для различных точек;  $\epsilon_i$  распределена нормально.

Рассмотрим уравнение

$$\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 = \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{T})^2 + \sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - \bar{T})^2, \quad (10)$$

где  $T_i - \bar{T}$  - отклонение  $i$ -го наблюдения от среднего;  $T_i - \hat{T}$  - отклонение  $i$ -го наблюдения от вычисленного по регрессионной модели;  $\hat{T}_i - \bar{T}$  - отклонение вычисленного по модели значения температуры от среднего.

Среднеквадратичное отклонение относительно регрессии

$$s^2 = \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{T}_i)^2 / (N - P), \quad (11)$$

где  $P$  - число параметров модели ( $P=4$ ).

Матрица дисперсий для коэффициентов регрессии имеет вид

$$(Z^T Z)^{-1} \sigma^2,$$

дисперсия для коэффициента

$$\alpha_i - D(\alpha_i) = C_{ij} \sigma^2,$$

где  $C_{ij}$  - диагональный элемент матрицы  $(Z^T Z)^{-1}$ .

Статистическая оценка для дисперсии  $\alpha_i$  есть  $s^2 c_{ij}$ , а оценка стандартной ошибки  $s\sqrt{c_{ij}}$ . В силу нормальности распределения ошибок аппроксимации  $\varepsilon_i$  можно получить  $100(1-\alpha)\%$ -ные доверительные интервалы для  $\alpha_i$  как

$$\alpha_i \pm t(v, 1 - \frac{\alpha}{2}) \cdot s\sqrt{c_{ij}},$$

где  $t(v, 1 - \frac{\alpha}{2})$  -  $(1 - \frac{\alpha}{2})$  - процентиль распределения Стьюдента с  $v = N - P$  степенями свободы.

Рассмотрим также отношение

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - \bar{T})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}.$$

Эта величина представляет собой квадрат множественного коэффициента корреляции, или меру полезности параметров  $\alpha_i$  (кроме  $\alpha_0$ ) в модели. Результаты расчетов  $R^2$ ,  $s$  и доверительных интервалов для четырех фрагментов различных размеров приведены в таблице.

Из таблицы видно, что применение модели (1) для фрагментов размером  $24 \times 24 \text{ км}^2$ , а особенно  $12 \times 12 \text{ км}^2$  не дает приемлемых результатов, так как доверительные интервалы для большинства  $\alpha_i$  содержат и нулевые значения коэффициентов. Следует отметить, что для больших фрагментов оценка  $s$  не превышает  $1^\circ$ , что свидетельствует о незначительном ухудшении аппроксимации с увеличением фрагмента.

Для получения удовлетворительных результатов необходимо выбирать фрагменты для исследования в районах, свободных от облачности. Наличие облаков, особенно в фрагментах большого размера, приводит к увеличению дисперсии данных и как следствие - к ухудшению аппроксимации.

Кроме того, разработаны программные средства для переноса информации на микропроцессорный информационно-вычислительный комплекс (ИВК). Ввиду использования перфоленточных устройств для экономии носителя и времени на перенос данных предусмотрены следующие операции:

- вычитание постоянной составляющей,
- округление до  $0.1^\circ$ ,
- преобразование к целому типу.

Применение этих мер позволило сэкономить по 5-8 символов на одно значение температуры. Благодаря этому время вывода массива объемом в несколько тысяч чисел из универсальной ЭВМ с перекодировкой в формат данных ИВК не превышает 10 мин при приемлемом расходе носителя. Время ввода в ИВК того же массива с преобразованием в реальные значения не превышает 1-2 мин.

Результаты расчетов статистических оценок

Размер фрагмента, км <sup>2</sup>	$R^2$	$S$	Оценка коэф-фициента	Доверительный интервал для $\alpha$	
				0,1	0,2
12 x 12	0.20	1.048	$a_1 = 0.555$	<u>+0.596</u>	<u>+0.450</u>
			$a_2 = -0.002$	<u>+0.671</u>	<u>+0.507</u>
			$a_3 = 0.140$	<u>+0.846</u>	<u>+0.639</u>
12 x 12	0.26	0.802	$a_1 = 0.278$	<u>+0.450</u>	<u>+0.340</u>
			$a_2 = 0.419$	<u>+0.522</u>	<u>+0.394</u>
			$a_3 = -0.279$	<u>+0.648</u>	<u>+0.489</u>
24 x 24	0.21	0.929	$a_1 = -0.177$	<u>+0.151</u>	<u>+0.117</u>
			$a_2 = 0.023$	<u>+0.185</u>	<u>+0.143</u>
			$a_3 = 0.211$	<u>+0.128</u>	<u>+0.099</u>
84 x 84	0.11	0.946	$a_1 = 0.072$	<u>+0.017</u>	<u>+0.013</u>
			$a_2 = 0.028$	<u>+0.018</u>	<u>+0.014</u>
			$a_3 = -0.001$	<u>+0.004</u>	<u>+0.003</u>

Установка для обработки, анализа и документирования в графической форме цифровой карты температур представляет собой микро-ИВК в составе:

- ЭВМ "Электроника-60" в комплекте с пультным терминалом МERA, перфоленточной станцией СМ-6204 и быстродействующим устройством печати DZM-180;

- крейт КАМАК в составе: контролер крейта К-16, модуль цифро-аналогового преобразователя 2ЦАП-10 для управления двухкоординатным самописцем, модули "Текст", "График" и "Репер" дисплейного набора "Динамо" для управления алфавитно-цифровым графическим дисплеем на базе телевизионного приемника;

- графопостроитель Н-306 и графический дисплей, в качестве которого использован стандартный телевизионный приемник.

Данные цифровой карты температур вводятся в ЭВМ с перфоленты. Максимальное количество одновременно загружаемой информации о карте температур при максимальной емкости памяти машины 32К 16-разрядных слоев с учетом затрат на хранение в оперативной памяти системных программ и программ обработки составило около 15К слов. Такой объем достаточен для кодирования информации, соответствующей участку поверхности площадью 0.2 млн. км<sup>2</sup>, что удовлетворительно для многих применений.

Программное обеспечение включает три основные программы, названные „Графический анализатор“, „Графический копировщик“, „Объемный интерпретатор“, а также диалоговую управляющую программу.

Графический анализатор позволяет выводить участки цифровой карты температур размером 32x32 точки при количестве уровней градаций температуры 64 на телевизионный графический дисплей при символьном кодировании значений температур, выделять или выводить отдельно заданные оператором изотермы или максимальное значение температуры с выводом на печать его значения и относительных координат точки максимума. Графический копировщик дает возможность вывести содержимое экрана телевизионного приемника в указанной выше форме на печатающее устройство. Объемный интерпретатор обеспечивает получение с помощью графического дисплея и графопостроителя картины пространственного распределения температур в аксонометрической проекции. Аксонометрия строится путем пересчета координат точек по формулам

$$z_1 = T - (x_1 + x_2)/2,$$

$$z_2 = (x_1 - x_2) \cdot \sqrt{3}/2,$$

где  $T$  - температура в точках  $x_1$  и  $x_2$ ,  $z_1$  и  $z_2$  - координаты соответствующей точки в аксонометрической проекции.

Программное обеспечение реализовано на языке КВЕЙСИК. Это дало возможность получить необходимую скорость вывода данных на графический дисплей и графопостроитель (время выполнения одной КАМАК-операции при использовании языка КВЕЙСИК составляет около 30 мкс, при программировании в машинных кодах - не менее 20). В то же время сохраняются удобство программирования и легкая читаемость программ; имеются простые средства для составления диалоговой управляющей программы. Необходимая емкость памяти для хранения КВЕЙСИК-компилятора невелика и составляет около 5К слов. Быстродействие и разрядная сетка ЭВМ „Электроника-60“ оказываются достаточными также и для решения несложных задач цифровой обработки типа пространственной фильтрации или кусочной аппроксимации цифровой карты. Например, программа на языке КВЕЙСИК, реализующая описанную методику на фрагменте размером 3000 точек, составляет еще около 4К слов памяти для дальнейшего развития.

#### Л и т е р а т у р а

В и ш н е в с к и й А. Е., Т а р а с о в В. С. Обработка на ЭВМ данных со сканирующих датчиков большой информационной производительности. - В кн.: Технические средства

для Государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП). Обнинск, 1983, ч. I, с. 93-95.

В и ш н е в с к и й А.Е., Т а р а с о в В.С., В и н о г р а д о в В.В., С м и р н о в В.Г. Автоматизированная система сбора и обработки спутниковой информации. - В кн.: Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Л., 1982, вып. 5, с. 32-37.

К.Я. Кондратьев, Г.В. Дружинин

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ДИСТАНЦИОННОГО  
МОНИТОРИНГА ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ  
ЭВТРОФИРОВАНИЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА  
И ОЗЕР ЕГО БАССЕЙНА

В период с 1982 по 1985 г. Лаборатория дистанционных методов Института озераведения АН СССР совместно с рядом научно-исследовательских организаций СССР разрабатывала дистанционные методы слежения за эвтрофированием озер. К настоящему времени имеются достаточно надежные методики, позволяющие дистанционно следить за развитием следующих компонентов процесса эвтрофирования озер:

- 1) поступлением и распространением биогенных элементов, проникающих в озеро со сточными водами и водами притоков;
- 2) формированием в озерных водах гидротермических и гидрооптических зон, оптимальных для „цветения” воды;
- 3) образованием и динамикой зон „цветения” и прибрежного зарастания.

Указанные методические разработки, будучи обоснованы теоретически, охватывают основные компоненты развития процесса эвтрофирования, достаточно удовлетворительно согласуются с традиционными методами слежения за развитием эвтрофирования и, наконец, обеспечивают многократное повышение оперативности и обзорности слежения. Представляется, что в совокупности эти обстоятельства могут служить достаточным основанием для внедрения упомянутых разработок в практику мероприятий по контролю за окружающей средой.

Современное состояние Ладожского озера и озер его бассейна определило необходимость принятия Постановления Совета Министров СССР за № 1212 от декабря 1984 г. „О дополнительных мерах по обеспечению охраны и рационального использования водных и других природных ресурсов бассейна озер Ладожского, Онежского и Ильмень”. В этой связи крайне важно обеспечить комплексное применение традиционных и дистанционных методов наблюдений для контроля за состоянием этих озер. Принимая во внимание также, что переход от научных разработок к их практическому использованию потребует решения ряда дополнительных научно-технических вопросов (в основном связанных со сбором, передачей и обработкой информации), соответствующие разработки целесообразно выполнять в рамках целевой программы Го-

сударственного комитета СССР по науке и технике с включением в качестве соисполнителей необходимых научно-исследовательских организаций соответствующих ведомств.

Результатом разработок должен явиться практически действующий комплекс *слежения* за состоянием озер, который может быть положен в основу организации общесоюзной системы мониторинга эвтрофирования природных вод с последующим переходом к единой системе мониторинга качества вод озер, водохранилищ и морей.

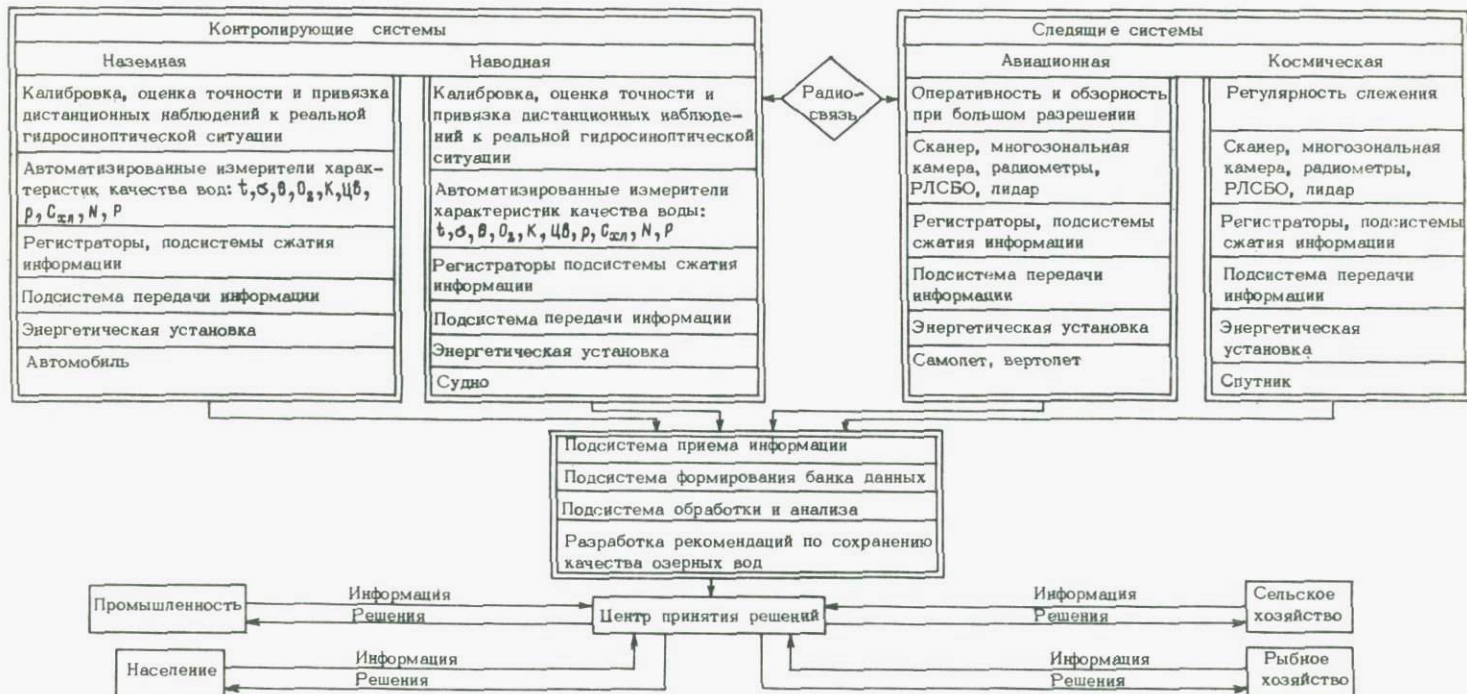
Комплекс мониторинга с применением прямых и дистанционных средств наблюдений может быть схематически представлен в виде совокупности шести взаимодействующих функциональных систем:

- 1) системы наземного контроля за состоянием вод в гидрографической сети водосбора;
- 2) системы наводного контроля за состоянием вод озер Ладожского, Онежского и Ильмень;
- 3) системы авиационных методов слежения за состоянием вод озер и водосбора; ее основная задача – обеспечение оперативности и обзорности наблюдений при их большом разрешении;
- 4) системы космических методов слежения за состоянием вод озер и водосбора; ее основная задача – обеспечение регулярности наблюдений.

Каждая из этих четырех систем предлагаемого комплекса (наземная, наводная, авиационная и космическая) должна представлять собой совокупность точно соответствующих друг другу подсистем – измерителей, регистраторов, аппаратуры первичной обработки и передачи информации, а также носителей этих подсистем.

а. Подсистема измерений. Обеспечение оперативности дистанционного мониторинга требует использования быстродействующей автоматизированной измерительной аппаратуры, в состав которой должны входить измерители тех характеристик качества воды, которые являются прямыми или косвенными показателями прогресса эвтрофирования. Для калибровочных наземных и наводных систем это измерители температуры воды, прозрачности, электропроводности, содержания растворенного кислорода, цветности, спектрального пропускания, подводной освещенности, а также содержания взвесей, хлорофилла и биогенных элементов (азот и фосфор).

В состав аппаратурного комплекса аэрокосмических систем должны входить: многозональные камеры, обеспечивающие слежение за распространением сточных вод и вод притоков в озерах, а также за динамикой снежного покрова на водосборе, влияющей на ход процесса эвтрофирования; радиометры, обеспечивающие слежение за формированием гидротермических зон, оптимальных для «цветения» озер; радиолокационные станции бокового обзора (РЛСБО), обеспечивающие слежение за элементами динамики озерных вод, влияющей на формирование зон «цветения».



тения"; сканирующие спектрометры и лидары, обеспечивающие слежение за распределением концентрации хлорофилла и взвесей в озерах, а также за динамикой зон „цветения“.

б. Регистрирующие подсистемы. Использование быстродействующих автоматизированных измерителей требует применения столь же быстродействующих регистраторов (запись на бумажные, магнитные или перфоленты, перфокарты, фоторегистрация), которые являются первичными элементами накопления информации (формирования банка данных).

в. Подсистемы первичной обработки. Использование быстродействующих измерителей-регистраторов, в особенности аппаратуры непрерывного действия, приводит к получению такого количества информации, оперативная передача которого затруднена. Поэтому контролирующие и дистанционные системы должны быть снабжены подсистемами первичной обработки с целью сжатия информации (первичная классификация, графопостроение, табличная распечатка).

г. Подсистемы передачи информации. Требование оперативности мониторинга обуславливает необходимость немедленной передачи информации в центр обработки и анализа, что приводит к необходимости оборудования контролирующих и дистанционных систем устройствами, обеспечивающими надежную передачу информации в пределах водосбора.

д. Носители контролирующих и следящих систем. Требование оперативности и обзорности мониторинга определяет необходимость использования подвижных измерительных систем, смонтированных на носителях, обеспечивающих выполнение оперативных съемок в пределах водосбора и акватории озер (автомобиль, судно, самолет или вертолет, ИСЗ).

Преимущества мониторинга, основанного на использовании подвижных измерительных систем, показаны в работе С.В. Доценко (1974), а принципы взаимодействия подсистем и методы их применения на озерах представлены в работе Г.В. Дружинина (1984). Аналогичные методические разработки необходимы также и относительно общих принципов мониторинга водосборов подвижными наземными и аэрокосмическими системами.

5. Система приема, обработки и анализа данных, состоящая из подсистем приема, аппаратуры для обработки и анализа видео- и цифровой информации, подсистемы формирования банка данных, ЭВМ достаточной мощности для анализа всего объема информации и пакета алгоритмов для разработки рекомендаций, передаваемых в центр, координирующий хозяйственную деятельность в пределах ладожского водосбора.

6. Функции решающего центра могут быть организованы по принципу обратной связи - информация о хозяйственных потребностях и состоянии вод является управляющими сигналами для регулирования хозяйственной деятельности в рамках всего комплекса ладожского бассейна. Поэтому центр должен иметь под-

системы оперативного сбора информации о водопотреблении в пределах всего водосбора Ладожского озера.

Информация, поступающая от дистанционных следящих систем и наземной калибрующей системы, отражает состояние водосбора и является основанием для прогноза эвтрофирования озер.

Информация, поступающая от дистанционных следящих систем и наводной калибрующей системы, отражает состояние вод озера и является основанием для разработки рекомендаций по сохранению качества озерных вод.

Комплекс аппаратуры, входящей в состав следящих и контролируемых систем, направлен на мониторинг эвтрофирования вод, но та же аппаратура может быть использована и для других целей, например для слежения за нефтяным загрязнением, тепловым загрязнением, а также за рядом характеристик водосбора (влажность почв, состояние сельскохозяйственных культур, распределение и динамика снегового покрова и др.).

В предлагаемом комплексе пока не учтены такие факторы, влияющие на эвтрофирование, как поступление биогенных элементов из атмосферы и влияние климатических колебаний; введение этих элементов в комплекс (по мере его разработки) значительно повысит репрезентативность мониторинга эвтрофирования и расширит возможности использования комплекса для решения других задач, например для исследования загрязнения атмосферы.

Использование предлагаемого комплекса на Ладожском озере может иметь существенное значение для решения соответствующих научных и научно-методических задач. Например, при существовании четко сформулированных граничных условий и критериев подобия Ладожское озеро может рассматриваться как модель океана (подобные разработки выполняются в Институте озероведения АН СССР в настоящее время). Такая постановка вопроса открывает возможности, в частности, для использования программы „Разрезы“:

- решения методических задач в интересах океанологических исследований с меньшими затратами средств и времени;
- проведения комплексных натуральных экспериментов в рамках контролируемых граничных условий, что трудно осуществить на океанических полигонах.

#### Л и т е р а т у р а

- Д о ц е н к о С.С. Теоретические основы измерения физических полей океана. Л., 1974. 161 с.
- Д р у ж и н и н Г.В. Мониторинг внутриконтинентальных водоемов. -- Водные ресурсы, 1984, № 5, с. 2-15.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Г. Оптические свойства озерных вод, антропогенное эвтрофирование и его дистанционный мониторинг	
К о н д р а т ь е в К.Я., Д р у ж и н и н Г.В. Комплексные исследования для разработки дистанционных методов слежения за эвтрофированием озер .....	6
П е т р о в а Н.А., Г у с а к о в Б.Л., Т е р ж е в и к А.Ю. Основные закономерности развития процесса антропогенного эвтрофирования в больших глубоких озерах (на примере Ладожского озера) .....	12
Д р у ж и н и н Г.В. Первая стадия эвтрофирования - поступление и распространение биогенных элементов в озере .....	17
Р у м я н ц е в В.Б. Оптическая структура Ладожского озера .....	19
Ч е х и н Л.П. Некоторые световые граничные условия гидробиологических процессов .....	36
Р у м я н ц е в В.Б., К о р о т к е в и ч О.Е., Ю д и н Е.А. Оптически активные компоненты вод Ладожского озера ...	47
К о р о т к е в и ч О.Е., Р у м я н ц е в В.Б., Г а й ц х о к и Б.Я., В о л о д и н Е.С. Рассеяние света в воде крупных озер .....	51
К о н д р а т ь е в К.Я., К о р о т к е в и ч О.Е., В а с и л ь е в О.Б., Г р и ш е ч к и н В.С., П о б е р о в с к а я Л.Н., Ф а р а г о Т. Цветовые характеристики вод Ладожского озера .....	55
Б а р ы ш е в а Л.Ф. К вопросу о взаимном соответствии применяемых в лимнологии цветовых характеристик вод .....	60
К о н д р а т ь е в К.Я., Д р у ж и н и н Г.В., О с т р о в с к и й С.Ю., Ф е д ч е н к о П.П. Экспериментальное исследование цветовых характеристик воды при различной концентрации в ней взвесей и хлорофилла .....	65
Б р у к В.В., М а л ы х и н а И.И., Ш у м а к о в Ф.Т., Д р у ж и н и н Г.В. О корреляционных связях между гидрооптическими и гидрохимическими характеристиками различных типов вод Ладожского озера .....	67
Ш л я х о в а Л.А., О ш е п к о в С.Л. О возможности восстановления микроструктуры взвеси в олиготрофных водоемах по спектрам показателя ослабления света .....	70
Л а х т а н о в Г.А., Ч у р о в В.Е., П и о т р о в с к а я А.П. Определение концентрации взвеси в поверхност-	

ном слое воды по степени поляризации восходящего излучения .....	76
К ондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Принципиальные основы решения задачи дистанционного зондирования хлорофилла в естественных водоемах .....	82
К ондратьев К.Я., Атанасян В.Г., Барышева Л.Ф., Назарян А.А., Поздняков Д.В. Лидарное флуоресцентное зондирование хлорофилла в водах Онежского озера .....	113
К ондратьев К.Я., Барышева Л.Ф., Поздняков Д.В., Атанасян В.Г., Назарян А.А. Лидарное флуоресцентное зондирование хлорофилла в водах Онежского озера .....	119
К ороткевич О.Е., Барышева Л.Ф., Шавыкин А.А., Старун С.С., Черноок В.И. Исследование распределения хлорофилла в Онежском озере с помощью безэкстрактной флуоресцентной методики .....	123
Ш авыкин А.А., Степин С.Б., Старун С.С., Короткевич О.Е., Шумаков Ф.Т. Некоторые вопросы применения безэкстрактной флуоресцентной методики для экспрессного определения хлорофилла во внутренних водоемах .....	129
К ондратьев К.Я., Дружинин Г.В. Маркирующие признаки элементов динамики озерных вод .....	140
К антер Р.Р., Каргин Б.А., Поздняков Д.В. Моделирование оптических наблюдений водоемов .....	150
Р умянцев В.Б. Экологические особенности поверхностной пленки воды в озерах .....	159
II. Тепловой и радиационный режим	
А даменко В.Н., Александрова Л.С., Изотова Л.Ф., Чехин Л.П. К оценке составляющих теплового и водного балансов с использованием дистанционно получаемой информации (применительно к задачам климатологии озер) .....	163
Т ихомиров А.И. Дистанционное зондирование температуры поверхности водоемов .....	168
Т ихомиров А.И., Каретников С.Г., Вишневецкий А.Е., Широков К.П. Сравнительная характеристика радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера .....	173
В ишневецкий А.Е. Сравнение статистических характеристик полей температур, полученных контактными и дистанционными методами .....	183
В асильев О.Б., Гришечкин В.С., Кондратьев К.Я. Спектральные радиационные характеристики свободной атмосферы над акваторией Ладожского озера .....	187
К ондратьев К.Я., Горелова Э.М., Жвалев В.Ф. Вертикальные профили радиационного баланса и его составляющих над Ладожским озером по данным самолетных и судовых наблюдений .....	207

### III. Ледяной покров

- К ондр ать е в К.Я., В лас о в В.П., В асиль-  
е в О.Б., Г ри шеч ки н В.С., Н е бо ль си н К.В.  
Спектральные оптические характеристики тающего ледяного  
покрова (на примере Онежского озера и Белого моря) ..... 211
- К ондр ать е в К.Я., В лас о в В.П., М елент ь-  
е в В.В. Характеристики тающего ледяного покрова, вос-  
становленные по его полю излучения в СВЧ-диапазоне (на  
примере оз. Севан) ..... 217

### IV. Аппаратура и методика измерений

- В асиль е в О.Б., Г ри шеч ки н В.С., К о в а-  
л ен ко А.П., Т ов ст ен ко И.А., Ш у ль ц Э.О.,  
К ондр ать е в К.Я. Спектральная информационно-  
измерительная система для исследования поля коротковол-  
нового излучения в атмосфере с земной поверхности и с са-  
молета ..... 225
- Г и т ель с о н А.А., З а в о л о ки н Ю.В., С у х о-  
р у ко в Б.Л. Методология сбора оперативной опорной  
информации на полигонах поверхностных вод для интерпрета-  
ции дистанционных данных ..... 239
- Д р у ж и ни н Г.В., Е го ро в Л.К., К рю ч ко в А.М.,  
К о ш е л е в Л.С., О ст ро в с ки й С.Ю., Ш и п-  
ч и н с ки й Г.А. Автоматизированный комплекс прибо-  
ров для экспресс-методов измерений гидрофизических харак-  
теристик озерных вод ..... 245
- Д р у ж и ни н Г.В., Е го ро в Л.К., С туч е в-  
с ки й М.А. Судовые методы обеспечения комплексных  
аэрокосмических экспериментов ..... 250
- П о в х В.И., Ф о ми н Г.В. Вероятность регистрации бли-  
ков спектральным прибором ..... 256
- Т а р а с о в В.С., В и ш н е в с ки й А.Е., Т у ты-  
г и н В.С., З а в а р ю хи н В.В., П о де ли н-  
с ка я А.А. Методика обработки результатов дистанцион-  
ных измерений на ЭВМ ..... 261

### V. Заключение

- К ондр ать е в К.Я., Д р у ж и ни н Г.В. Об орга-  
низации комплексного дистанционного мониторинга факторов,  
определяющих эвтрофирование Ладожского озера и озер его  
бассейна ..... 269

КОМПЛЕКСНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ  
МОНИТОРИНГ ОЗЕР

Утверждено к печати  
Институтом озераведения АН СССР

Редактор издательства Е.А. Семенова  
Художник И.П. Кремлев  
Технический редактор В.В. Шиханова  
Корректор М.Е. Едемская

ИБ № 21378

Подписано к печати 27.02.87. М-17075. Формат 60x90 1/16.  
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.00 +  
+ 0.40 печ. л. вкл. Усл. кр.-от. 18.65. Уч.-изд. л. 19.60.  
Тираж 750. Тип. зак. № 770. Цена 3 р.

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство „Наука“. Ленинградское отделение.  
199034, Ленинград, В-34, Менделеевская лин., 1.

---

Ордена Трудового Красного Знамени  
Первая типография издательства „Наука“.  
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12.

УДК 528.8

Кондратьев К.Я., Дружинин Г.В. Комплексные исследования для разработки дистанционных методов слежения за эвтрофированием озер. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.; Наука, 1987, с. 6-11.

На основе анализа процесса эвтрофирования озер предложен необходимый комплекс дистанционных методов для контроля за ходом этого процесса: поступлением биогенных элементов с водами притоков; формированием зон, оптимальных для «цветения» воды. Схема.

УДК 551, 481.1

Петрова Н.А., Гусаков Б.Л., Тержевик А.Ю. Основные закономерности развития процесса антропогенного эвтрофирования в больших глубоких озерах (на примере Ладожского озера). - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 12-17.

Рассматриваются последовательные стадии развития процесса антропогенного эвтрофирования в большом глубоком озере; оценивается необходимость проведения различного комплекса лимнологических исследований (включая дистанционные методы) на каждой из указанных стадий. Библиогр. 4 назв.

УДК 556, 551:528.8

Дружинин Г.В. Первая стадия эвтрофирования - поступление и распространение биогенных элементов в озере. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 17-19.

Предложен способ косвенного определения поступления в озеро биогенных элементов с водами притоков и сточными водами на основе экспресс-измерений комплекса гидрофизических характеристик. Библиогр. 3 назв.

УДК 551, 463.5

Румянцев В.Б. Оптическая структура Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 19-35.

Установлено, что глубинная оптическая структура озера через динамику водных масс (течения, внутренние волны, апвеллинг, вихревые образования) проявляется и фиксируется дистанционными методами в виде оптических контрастов на поверхности озера. Библиогр. 26 назв. Табл. 2. Ил. 8.

УДК 574.5.535

Чехин Л.П. Некоторые световые граничные условия гидробиологических процессов. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 36-46.

Оценено влияние светового фактора на ход биологических процессов в водоемах. Рассмотрены вопросы связи эвфотной зоны с прозрачностью и глубиной

фотического слоя, влияние температуры на фотоингибирование, процент утилизации света при фотосинтезе. Библиогр. 26. назв. Табл. 2. Ил. 4.

УДК 551.463:538,3

Румянцев В.Б., Короткевич О.Е., Юдин Е.А. Оптически активные компоненты вод Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 47-51.

При дистанционном зондировании озер требуется оперативное решение задачи об оптических параметрах водной среды. Данная работа частично решает эту задачу. Библиогр. 2 назв. Табл. 2.

УДК 556.551:556,113,3

Короткевич О.Е., Румянцев В.Б., Гайцхоки Б.Я., Володин Е.С. Рассеяние света в воде крупных озер. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 51-54.

Измерения рассеяния света, проведенные в области спектра 530-555 нм, показали, что доля рассеяния в общем ослаблении света для различных озерных водных масс составляет 66-97%, и для всех этих вод характерны сильно вытянутые индикатрисы. Показаны особенности рассеяния света в водах притоков и загрязненных водах. Библиогр. 4 назв. Табл. 2. Ил. 2.

УДК 556.551:528,8

Кондратьев К.Я., Короткевич О.Е., Васильев О.Б., Грищечкин В.С., Поберовская Л.Н., Фараго Т. Цветовые характеристики вод Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 55-60.

Показана возможность распознавания озерных водных масс и оконтуривания их границ по значениям цветовых координат. Анализируется кластеризация цветовых координат на примере Ладожского озера. Библиогр. 3 назв. Ил. 2.

УДК 551.482,213

Барышева Л.Ф. К вопросу о взаимном соответствии применяемых в лимнологии цветовых характеристик вод. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 60-65.

Рассмотрены вопросы установления взаимного соответствия между традиционно используемыми в лимнологии шкалами, характеризующими цветность естественных вод, а также их связи с цветовыми координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , предложенными МКО. Библиогр. 8 назв. Ил. 1.

УДК 528,8:556.551

Кондратьев К.Я., Дружинин Г.В., Островский С.Ю., Федченко П.П. Экспериментальное исследование цветовых характеристик воды при различной концентрации в ней взвесей и хлорофилла. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 65-67.

Обсуждаются результаты экспериментальных определений цветовых характеристик воды, выполненных в бассейне. Анализ полученных данных показал наличие тесной связи суммы координат цвета с концентрацией хлорофилла в воде. Библиогр. 2 назв. Ил. 3.

УДК 566. 551:528.8

Брук В.В., Малыгина И.И., Шумаков Ф.Т., Дружинин Г.В. О корреляционных связях между гидрооптическими и гидрохимическими характеристиками различных типов вод Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука. 1987, с. 67-70.

Рассчитаны корреляционные связи между гидрохимическими характеристиками вод Ладожского озера и пропусканием фильтрованной и нефилтрованной воды на длинах волн 350, 450, 550, 750 и 850 нм. Библиогр. 6 назв. Ил. 1.

УДК 551.463.5:551.465.78

Шляхова Л.А., Ощепков С.Л. О возможности восстановления микроструктуры взвеси в олиготрофных водоемах по спектрам показателя ослабления света. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 70-76.

В рамках метода модельных оценок исследована информативность спектральных измерений показателя ослабления света в видимой области длин волн при определении концентрации и степени дисперсности минеральной фракции взвеси в олиготрофных водоемах. Библиогр. 7 назв. Табл. 2. Ил. 1.

УДК 551.46.09:551.510.42

Лахтанов Г.А., Чуров В.Е., Пиотровская А.П. Определение концентрации взвеси в поверхностном слое воды по степени поляризации восходящего излучения. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 76-82.

На основе экспериментальных измерений с борта вертолета и с борта судна установлено, что существует устойчивая корреляция между степенью поляризации восходящего излучения и общей концентрацией взвеси, что может быть использовано для практических измерений концентраций взвеси в природных водах. Библиогр. 6 назв. Ил. 5.

УДК 535.361:551.46.01:581.5

Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Принципиальные основы решения задачи дистанционного зондирования хлорофилла в естественных водоемах. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 82-113.

Для различных гидрооптических условий проанализированы возможности спектроскопического, флуорометрического и колориметрического методов в решении задачи мониторинга хлорофилла как основного индикатора биологической продуктивности водоемов. Значительное внимание уделено проблеме репрезентативности первичных гидрооптических характеристик компонентов естествен-

ных вод и выработке на их основе биооптических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла. Показана необходимость их дальнейшего совершенствования. Библиогр. 62 назв. Табл. 5. Ил. 9.

УДК 556.115.042:528.8

Кондратьев К.Я., Барышева Л.Ф., Поздняков Д.В., Атанесян В.Г., Назарян А.А. Лидарное флуоресцентное зондирование хлорофилла в водах Онежского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 113-119.

Приводятся и обсуждаются результаты лидарного зондирования северо-восточной части Онежского озера с борта вертолета Ми-8. Определен линейный алгоритм связи концентрации хлорофилла и интенсивности регистрируемого откалиброванного (по сигналу комбинационного рассеяния воды) сигнала, обусловленного вынужденной флуоресценцией этого пигмента фитопланктона. Библиогр. 15 назв. Ил. 1.

УДК 528.8:556.551

Кондратьев К.Я., Дружинин Г.В., Козодеров В.В., Федченко П.П., Шумаков Ф.Т. Возможности дистанционного определения хлорофилла в воде на основе координат цвета. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 119-123.

Изложены предварительные результаты дистанционного метода определения содержания хлорофилла в воде на основе применения количественной колориметрии. Использование координат цвета позволяет полностью учитывать информацию, заключенную в спектральной кривой отражения. Сделан вывод о перспективности использования метода в дистанционных исследованиях. Библиогр. 3 назв. Ил. 2.

УДК 556.55:574.583

Короткевич О.Е., Барышева Л.Ф., Шавыкина А.А., Старун С.С., Черноок В.И. Исследование распределения хлорофилла в Онежском озере с помощью безэкстрактной флуоресцентной методики. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 123-128.

Рассмотрены результаты практического использования экспресс-методики. Показаны величины концентрации хлорофилла и интенсивности флуоресценции фона и характер их распределения по акватории водных масс различного происхождения и состава. Библиогр. 4 назв. Ил. 3.

УДК 556.55:574.583 (001.891)

Шавыкина А.А., Степин С.Б., Старун С.С., Короткевич О.Е., Шумаков Ф.Т. Некоторые вопросы применения безэкстрактной флуоресцентной методики для экспрессного определения хлорофилла во внутренних водоемах. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 129-139.

На основе проведенных методических полевых исследований показаны возможности использования экспресс-метода определения хлорофилла в озерных водах. Методом Керриша рассчитано градуировочное уравнение для вод Онежского озера. Исследована кинетика интенсивности флуоресценции озерных вод в присутствии диурона. Библиогр. 9 назв. Ил. 3.

УДК 566.551:528,8

Кондратьев К.Я., Дружинин Г.В. Маркирующие признаки элементов динамики озерных вод. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 140-150.

На достоверность определений концентрации хлорофилла в воде, выполняемых дистанционными методами, оказывают влияние различные гидродинамические ситуации. Для учета влияния динамики вод предложена система маркирующих признаков, позволяющая идентифицировать такие динамические явления в озерах, как апвеллинг, циркуляции Лэнгмюра, внутренние волны, горизонтальные внутриводные вихри, распространение вод притоков. Библиогр. 24 назв. Табл. 1. Ил. 4.

УДК 535.361.01

Кантер Р.Р., Каргин Б.А., Поздняков Д.В. Моделирование оптических наблюдений водоемов. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 150-159.

На основе последовательного применения метода Монте-Карло с использованием эмпирической гидрооптической модели озера рассчитаны некоторые характеристики поля отраженного водоемом солнечного света. Расчеты выполнены для оценки информативности оптических наблюдений водоемов с целью восстановления концентрации хлорофилла путем дистанционного зондирования. Результаты, полученные этим методом, сравнивались с расчетами по приближенным соотношениям, предложенным Букатой с сотрудниками. Оцененная точность восстановления по этим алгоритмам оказалась порядка 60%. Приведенный материал можно рассматривать как исходную предпосылку для замкнутого численного эксперимента. Библиогр. 15 назв. Табл. 3. Ил. 3

УДК 556.545.551

Румянцев В.Б. Экологические особенности поверхностной пленки воды в озерах. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 159-162.

Поверхностный слой воды (1-2 см в озерах и 5-10 см в морях) представляет собой активный переходный слой. Концентрация в нем органического вещества, количество бактерий, мелких минеральных частиц, пылицы, планктонных форм на 1-2 порядка выше, чем в нижележащих слоях воды, что сказывается на его оптических свойствах. Библиогр. 9 назв. Табл. 1. Ил. 2.

УДК 630:551.56

Адаменко В.Н., Александрова Л.С., Изотова Л.Ф., Чехин Л.П. К оценке составляющих теплового и водного балансов с использованием дистанционно получаемой информации (применительно к задачам

климатологии озер). - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 163-168.

Предложена схема алгоритмизации составляющих теплового и водного балансов на основе данных об облачности, температуре воздуха и осадках, что позволит использовать данные, полученные путем дистанционных измерений. Библиогр. 4 назв. Ил. 2.

УДК 556.555.4/5

Тихомиров А.И. Дистанционное зондирование температуры поверхности водоемов. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 168-173.

Рассматриваются причины повышенных и пониженных значений радиационной температуры по отношению к температуре поверхности воды, измеренной контактными термометрами. Показано, что на Ладожском озере при авиа-термосъемке радиометром температура воды до июля выше, а в последующие месяцы ниже температуры поверхности воды, измеренной контактными способом. Табл. 1. Ил. 2.

УДК 528.88, 556.555.4/4

Тихомиров А.И., Каретников С.Г., Вишневецкий А.Е., Широков К.П. Сравнительная характеристика радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 173-183.

Рассмотрен термический режим Ладожского озера в период его весеннего нагревания и методы измерения температуры поверхности воды с судна, самолета и ИСЗ. Показано, что в районах сгущения изотерм в зоне термического бара корреляционная связь между радиационной температурой и температурой поверхности отсутствует, а в остальной части озера удовлетворительна. Библиогр. 11 назв. Ил. 3.

УДК 528.88, 556.555.4/5

Вишневецкий А.Е. Сравнение статистических характеристик полей температур, получаемых контактными и дистанционными методами. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 183-186.

Изложена методика проведения совместных судовых, самолетных и спутниковых экспериментов. На основании качественного сравнения полей и сравнения характеристик по разрезам делается вывод о сопоставимости спутниковой информации с информацией, полученной традиционными способами. Табл. 1. Ил. 1. ¶

УДК 551.521

Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Кондратьев К.Я. Спектральные радиационные характеристики свободной атмосферы над акваторией Ладожского озера. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 187-207.

Приводятся результаты измерений спектральных радиационных характеристик в атмосфере над Ладожским озером. Библиогр. 3 назв. Ил. 7.

УДК 551.521

Кондратьев К.Я., Горелова Э.М., Жвалев В.Ф. Вертикальные профили радиационного баланса и его составляющих над Ладожским озером по данным самолетных и судовых наблюдений. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 207-210.

Приводятся результаты совместных судово-самолетных измерений, проведенных в мае 1983 г. на Ладожском озере. Библиогр. 3 назв. Табл. 1. Ил. 2.

УДК 551.526

Кондратьев К.Я., Власов В.П., Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Небольсин К.В. Спектральные оптические характеристики тающего ледяного покрова (на примере Онежского озера и Белого моря). - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 211-217.

Рассмотрены некоторые результаты спектрофотометрических самолетных зондировок тающего ледяного покрова на большом пресном озере и море. Показаны возможности идентификации изученных типов льдов на основе их оптических характеристик. Библиогр. 15 назв. Табл. 1. Ил. 1.

УДК 551.526

Кондратьев К.Я., Власов В.П., Мелентьев В.В. Характеристики тающего ледяного покрова, восстановленные по его полю излучения в СВЧ-диапазоне (на примере оз. Севан). - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 217-224.

Показаны возможности восстановления различных характеристик ледяного покрова в период его таяния: структуры льда, наличия свободной воды во льду, что позволяет судить о его плотности, а также возможности выявления трещин, разводий, полыней при фиксированном угле визирования и в режиме скарирования. Библиогр. 9 назв. Табл. 2. Ил. 1.

УДК 551.48:629.7

Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Коваленко А.П., Товстенко И.А., Шульц Э.О., Кондратьев К.Я. Спектральная информационно-измерительная система для исследования поля коротковолнового излучения в атмосфере с земной поверхности и с самолета. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 225-238.

Описан самолетный вариант информационно-измерительной системы для актинометрических исследований. Библиогр. 5 назв. Ил. 5.

Г и т е л ь с о н А.А., З а в а л о к и н Ю.В., С у х о р о у к о в Б.Л. Методология сбора оперативной опорной информации на полигонах поверхностных вод для интерпретации дистанционных данных. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 239-245.

Определен состав опорной информации и методы ее получения. Обсуждены проблемы образования контрольно-измерительных полигонов на этих объектах и алгоритмы поиска и исследования тестовых участков в двух случаях: наличия регулярной космической информации и ее отсутствия. Библиогр. 13 назв. Ил. 1.

УДК 528.8

Д р у ж и н и н Г.В., Е г о р о в Л.К., К р ю ч к о в А.М., К о ш е л е в Л.С., О с т р о в с к и й С.Ю., Ш и п ч и н с к и й Г.А. Автоматизированный комплекс приборов для экспресс-методов измерений гидрофизических характеристик озерных вод. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука 1987, с. 245-250.

Рассмотрен действующий комплекс приборов для экспресс-измерений характеристик озерных вод, состоящий из измерителей температуры, электропроводности и прозрачности воды, позволяющий выполнять наблюдения как по ходу судна в режиме буксировки, так и в режиме зондирования по глубине. Библиогр. 1 назв. Ил. 5.

УДК 528.8

Д р у ж и н и н Г.В., Е г о р о в Л.К., С т у ч е в с к и й М.А. Судовые методы обеспечения комплексных аэрокосмических экспериментов. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 250-256.

Рассмотрен ряд методик определения гидрохимических характеристик, применяемых в автоматических станциях контроля качества поверхностных вод, пригодных для использования в комплексе подспутниковых судовых экспресс-наблюдений. Библиогр. 12 назв. Табл. 1.

УДК 535.243.2

П о в х В.И., Ф о м и н Г.В. Вероятность регистрации бликов спектральным прибором. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 256-261.

Рассмотрен вклад бликовой составляющей, что позволяет выработать методику регистрации восходящего излучения с контролируемым учетом этого вклада. Библиогр. 3 назв. Ил. 4.

УДК 671.322 + 519:242 + 528.88

Т а р а с о в В.С., В и ш н е в с к и й А.Е., Т у т ы г и н В.С., З а в а р ю х и н В.В., П о д е л и н с к а я А.А. Методика обработки

результатов дистанционных измерений на ЭВМ. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 261-268.

Рассмотрена методика обработки двумерных полей на ЭВМ. Дается оценка точности предлагаемой методики для моделей второго порядка. Библиогр. 2 назв. Табл. 1;

УДК 528.8

К о н д р а т ь е в К. Я., Д р у ж и н и н Г. В. Об организации комплексного дистанционного мониторинга факторов, определяющих эвтрофирование Ладожского озера и озер его бассейна. - В кн.: Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987, с. 269-273.

Рассматривается ряд мероприятий, направленных на организацию комплекса дистанционного мониторинга эвтрофирования озер, включающего следующие взаимодействующие системы: 1 - наземного контроля за состоянием вод в гидрографической сети водосбора; 2 - наводного контроля за состоянием вод Ладожского озера; 3 - авиационных методов слежения за состоянием вод озер и водосбора; 4 - космических методов слежения за состоянием вод и водосбора; 5 - приема, обработки и анализа данных. Библиогр. 2 назв. Ил. 1.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА „НАУКА“  
МОЖНО ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАКАЗАТЬ  
В МАГАЗИНАХ КОНТОРЫ „АКАДЕМКНИГА“,  
В МЕСТНЫХ МАГАЗИНАХ КНИГОТОРГОВ  
ИЛИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ КООПЕРАЦИИ.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу:

117192, Москва, Мичуринский пр., 12. Магазин „Книга-почтой“  
Центральной конторы „Академкнига“.

197345, Ленинград, Петрозаводская ул., 7. Магазин „Книга-  
почтой“ Северо-Западной конторы „Академкнига“.

Или в ближайший магазин конторы „Академкнига“,  
имеющий отдел „Книга-почтой“:

- 480091, Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 („Книга-почтой“);
- 370005, Баку, Коммунистическая ул., 51 („Книга-почтой“);
- 232600, Вильнюс, ул. Университето, 4;
- 690088, Владивосток, Океанский пр., 140 („Книга-почтой“);
- 320093, Днепропетровск, пр. Гагарина, 24 („Книга-почтой“);
- 734001, Душанбе, пр. Ленина, 95 („Книга-почтой“);
- 375002, Ереван, ул. Туманяна, 31;
- 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 289 („Книга-почтой“);
- 420043, Казань, ул. Достоевского, 53;
- 252030, Киев, ул. Ленина, 42;
- 252142, Киев, пр. Вернадского, 79;
- 252030, Киев, ул. Пирогова, 2;
- 252030, Киев, ул. Пирогова, 4 („Книга-почтой“);
- 277012, Кишинев, пр. Ленина, 148 („Книга-почтой“);
- 343900, Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1 („Книга-почтой“);
- 660049, Красноярск, пр. Мира, 84;
- 443002, Куйбышев, пр. Ленина, 2 („Книга-почтой“);
- 191104, Ленинград, Литейный пр., 57;
- 199034, Ленинград, Таможенный пер., 2;
- 199004, Ленинград, 9 линия, 16;
- 220012, Минск, Ленинский пр., 72 („Книга-почтой“);

103009, Москва, ул. Горького, 19а;  
117312, Москва, ул. Вавилова, 55/7;  
630076, Новосибирск, Красный пр., 51;  
630090, Новосибирск, Морской пр., 22 („Книга-почтой“);  
142284, Протвино Московской обл., ул. Победы, 8;  
142292, Пушкино Московской обл., МР „В“, 1;  
620151, Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 („Книга-почтой“);  
700000, Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1;  
700029, Ташкент, ул. Ленина, 73;  
700100, Ташкент, ул. Шота Руставели, 43;  
700187, Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 („Книга-почтой“);  
634050, Томск, наб. реки Ушайки, 19;  
634050, Томск, Академический пр., 5;  
450059, Уфа, ул. Р. Зорге, 10 („Книга-почтой“);  
450025, Уфа, Коммунистическая ул., 49;  
720001, Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 („Книга-почтой“);  
310078, Харьков, ул. Дзержинского, 87 („Книга-почтой“).

3 руб.

4820



**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«НАУКА»  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ  
ОТДЕЛЕНИЕ**