

Дистанционная регистрация следа судна по проявлениям на морской поверхности и приповерхностном слое морской среды и атмосферы

© В.Н. Носов¹, С.Б. Каледин², С.Г. Иванов¹, В.И. Тимонин²

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН), 119991 Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

e-mail: sbkaledin@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2019 г.

В окончательной редакции 23.05.2019 г.

Принята к публикации 04.06.2019 г.

Рассмотрены вопросы регистрации проявлений воздействий гидродинамических возмущений на три среды: морскую поверхность, приповерхностный слой и приводную атмосферу. Для исследований использованы три метода и аппаратура для их реализации в виде: сканирующего лазерного локатора, фотометра яркости моря и аэрозольного лидара упругого рассеяния. Экспериментальные исследования проводились в натурных условиях Черноморского полигона. Источником гидродинамических возмущений в виде отстающего следа являлось надводное судно. Анализ полученных результатов показал достаточную эффективность использованных методов и аппаратуры для регистрации проявлений следа судна в трех средах.

Ключевые слова: дистанционное оптическое зондирование, поверхностное морское волнение, приводный аэрозоль, гидродинамический источник возбуждения.

DOI: 10.21883/OS.2019.10.48366.165-19

Введение

Изучение процессов и явлений в Мировом океане давно интересует исследователей, в частности, с точки зрения обнаружения и регистрации слабых гидродинамических возмущений (ГДВ), вызванных разными источниками. Такие возмущения чаще наблюдаются в виде косвенных проявлений изменения характеристик и параметров в водной толще, на поверхности и в приповерхностном слое атмосферы [1–4]. Одним из наиболее удобных для изучения проявлений различного рода ГДВ является след судна. Движущееся судно является генератором как волновых, так и турбулентных возмущений морской среды, присущих многим гидродинамическим источникам естественного и искусственного происхождения [5,6]. Среди большого набора разных методов исследования наиболее востребованы и перспективны дистанционные радиолокационные и оптические способы [7–11]. С их помощью удается дистанционно получать информацию о состоянии названных сред. Однако радиолокационные методы, обладающие известными достоинствами, уступают лазерно-оптическим методам в точности и разрешающей способности. Кроме того, взаимодействие радиоволн с морской поверхностью часто носит резонансный характер, что ограничивает возможности регистрации. В связи с этим применение лазерно-оптических способов исследования явлений в морской среде является, на наш взгляд, весьма актуальным и перспективным направлением.

Постановка задачи

Перспективные оптические системы дистанционного изучения морской среды должны обеспечивать высокое пространственное разрешение, обладая при этом необходимой энергетической чувствительностью. В связи с этим возникает вопрос выбора и обоснования наиболее эффективных методов дистанционного оптического зондирования состояния трех сред: взволнованной морской поверхности, приповерхностной водной толщи и приводного аэрозоля. Данные методы должны быть достаточно просты в технической реализации. Немаловажной задачей является разработка алгоритмов и программная реализация методов обработки информации и выделения важнейших информативных признаков.

Основные методы исследования

Для исследования проявлений воздействия (ГДВ) на морской поверхности может быть использован известный метод сканирования узким лазерным лучом [12]. Метод лазерного сканирования заключается в регистрации и последующей обработке импульсов излучения, возникающих при отражении лазерного луча от морской поверхности, в моменты, когда нормаль к водной поверхности в точке падения луча совпадает с осью освещающего пучка.

Авторами настоящей работы метод сканирования морской поверхности узким лазерным лучом был положен в основу принципа действия судового лазерного

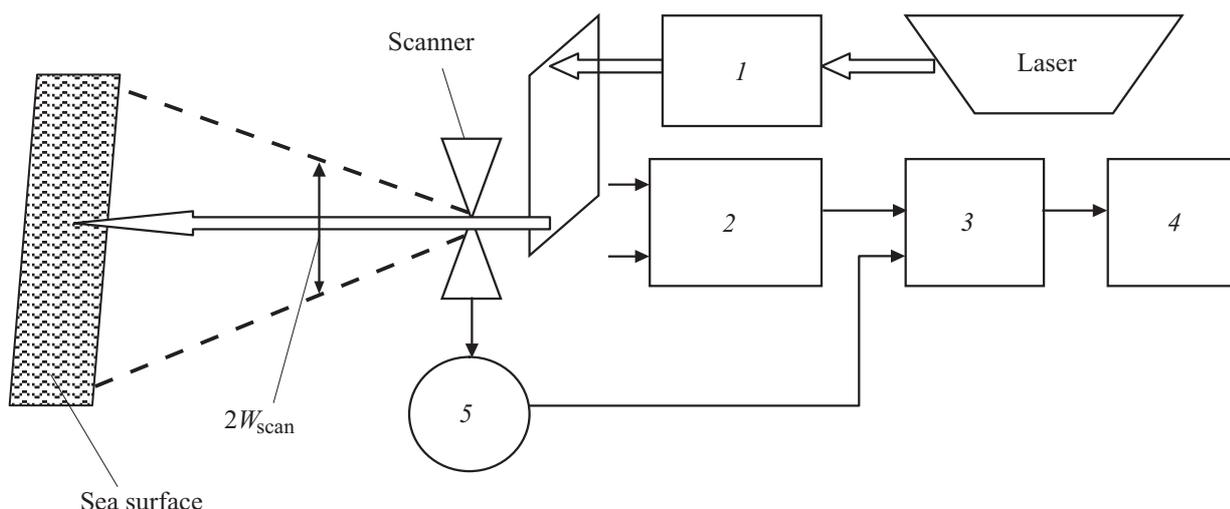


Рис. 1. Структурная схема морского сканирующего локатора: 1 — формирующая оптическая система, 2 — фотоприемное устройство, 3 — аналого-цифровой преобразователь, 4 — персональный компьютер, 5 — синхродатчик.

локатора (СЛЛ) [13,14]. В состав локатора входят две оптические системы — канал лазерной подсветки и оптико-электронный приемный канал. Оптические оси обоих каналов коаксиально объединены, что значительно упрощает процесс пространственного сканирования и устраняет ошибки, связанные с параллаксом (рис. 1).

При сканировании морской поверхности в пределах угла $2W_{scan}$ поперек направления движения носителя регистрируются сигналы, вызванные бликовым отражением от поверхности. Из-за большой линейной скорости сканирования лазерного пучка на водной поверхности регистрируемые фотосигналы имеют форму коротких импульсов. Основными параметрами сигналов являются: амплитуда импульсов, временные интервалы между импульсами и угол относительно вертикали в момент регистрации блика.

Амплитуда импульсов определяется интенсивностью засветки и размером отражающей поверхности. Случайная форма морской поверхности не позволяет точно определить размеры бликующей зоны, поэтому удобнее использовать понятие эквивалентного радиуса сферической поверхности согласно формуле (1)

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{\mu \Phi_{thr} A_{light}}{\rho \tau \tau_{atm} \Phi_{las}} \frac{l}{D_{lens}}}, \quad (1)$$

где μ — отношение сигнал/шум, $\rho = 0.02$ — коэффициент отражения водной поверхности, Φ_{thr} — пороговая чувствительность ФПУ, A_{light} — площадь освещенной зоны на морской поверхности, τ_{atm} — коэффициент пропускания атмосферы на трассе, τ — коэффициент пропускания оптической системы, Φ_{las} — мощность лазера, l — длина трассы, D_{lens} — диаметр зрачка объектива приемной системы.

Временной интервал между импульсами определяется пространственными масштабами волн вдоль трассы

сканирования. Угол визирования, под которым регистрируется заданная точка, связан с уклонами волнения. Используя временные интервалы и амплитудные данные принимаемых электрических импульсов, можно получить гистограммы распределений расстояний между зеркальными бликами (определяемых масштабами волнения) и радиусов кривизны водной поверхности.

Изменение концентрации приводного аэрозоля [15–17] может быть зарегистрировано различными способами. В настоящей работе авторами для регистрации рассеяния лазерного излучения на аэрозоле была выбрана лидарная схема, заключающаяся в регистрации интенсивности обратного светорассеяния. Применительно к поставленной задаче проводимого эксперимента оптимальной была принята бистатистическая схема аэрозольного лидара (рис. 2).

Схема аэрозольного лидара (АЛ) содержит два канала: лазерный канал модулированной подсветки и приемную оптико-электронную систему, разнесенные на величину базы B . Место пересечения оптических осей определяет ту область пространства X , состояние которой анализируется. Амплитуда фотосигнала зависит от оптических параметров аэрозоля (концентрации частиц, их дисперсного состава и т.д.), которые влияют на светорассеяние. Такая лидарная схема позволяет на дистанции L регистрировать изменения интегрального рассеяния в области X , что определяет пространственное разрешение. Для повышения чувствительности аэрозольного лидара использован принцип синхронного накопления при обработке фотосигналов.

Регистрация изменения состояния приповерхностного слоя моря осуществлялась с помощью двухканального фотометра яркости моря (ФЯМ) (рис. 3). В фотометре измеряется восходящая яркость моря в дневных условиях $B_M(\lambda)$ на двух выбранных длинах волн 440 и 540 nm и затем вычисляется усредненное отноше-

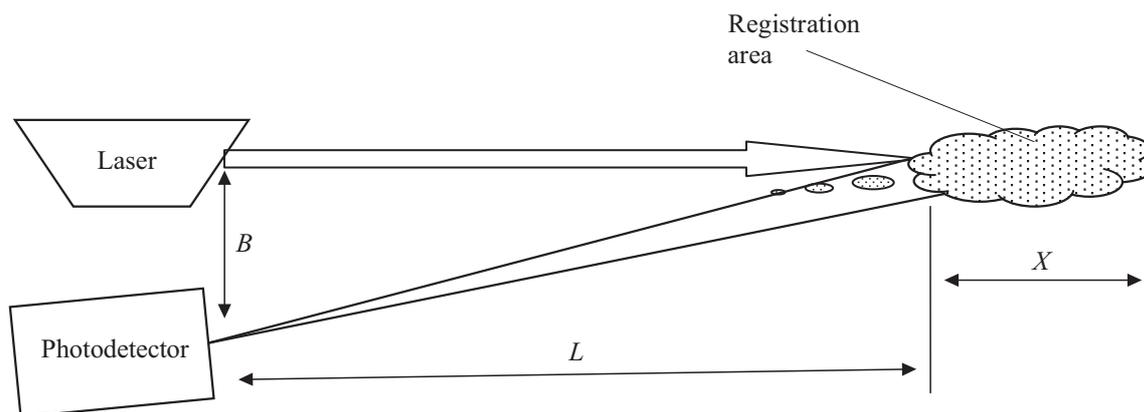


Рис. 2. Схема регистрации аэрозольного рассеяния.

ние этих яркостей $I = B_M(440)/B_M(540)$ [18–21]. Длина волны $\lambda_1 = 440 \text{ nm}$ находится вблизи максимума полосы поглощения хлорофилла „а“, содержащегося в фитопланктоне. Длина волны $\lambda_2 = 540 \text{ nm}$ попадает в спектральный диапазон, где поглощения хлорофилла „а“ отсутствует. Величина отношения яркостей I коррелирует с содержанием фитопланктона в приповерхностном слое моря, концентрация которого меняется при воздействии ГДВ. По этой причине при обработке результатов эксперимента наряду с анализом параметров $B_M(\lambda)$ исследовалась и величина их отношения I . В ряде случаев ее анализ позволяет уменьшить флуктуации полезного сигнала, связанные с морским волнением.

Техническая реализация и проведение исследований

Макеты приборов, реализующие названные методы, были установлены на борту научно-исследовательского судна. СЛЛ размещался на выносной консоли в носовой части судна, чтобы регистрировать морское волнение в невозмущенной области. ФЯМ и АЛ располагались на высоте 8 м за бортом. Все приборы установлены на стабилизирующих устройствах для уменьшения влияния качки судна.

Постановщиком гидродинамических возмущений являлся большой гидрографический катер БГК-889 водоизмещением 120 т (рис. 4). Он создавал поверхностный след, двигаясь со скоростью около 6 км.

В ходе экспериментов научно-исследовательское судно с приборами пересекало след судна-постановщика с определенной временной задержкой. При этом регистрировались сигналы до пересечения следа (фоновый участок) и в зоне следа. Экспериментальные натурные исследования проводились в акватории Черного моря при волнении моря до 3 баллов.

Полученные результаты и обсуждение

Экспериментальные данные, полученные при пересечении следа судна БГК-889 с возрастом около 100 с,

были статистически обработаны с помощью гистограммного анализа лазерных импульсов СЛЛ, отраженных от морской поверхности. Для каждого из временных интервалов составлялись две выборки: одна состояла из длин временных интервалов (в тысячных долях секунд) между начальными фронтами импульсов, а другая — из максимальных значений амплитуд (напряжений) импульсов. Для этих выборок строились ненормированные гистограммы. Ниже представлены примеры характерных гистограмм, полученных после обработки.

Гистограммы временных интервалов представлены на рис. 5, а, б. По оси абсцисс отложен временной интервал между импульсами в долях 0.1 мс, определяемый частотой оцифровки сигналов 10 кГц, использованной в АЦП. Из представленных гистограмм видно, что наибольшие изменения в гистограммах при пересечении следа БГК-889 происходят в области малых временных интервалов между импульсами СЛЛ в диапазоне 0–5 мс. Число импульсов в этом интервале за 6 с до пересечения составляет 90–97, а число импульсов в области пересечения — 54.

Аналогичным образом изменяются и гистограммы амплитуд сигналов СЛЛ. Вне следа БГК-889 (за 6 с до пересечения) число импульсов СЛЛ с наименьшими амплитудами в 2 раза превышает число импульсов из этого же диапазона в области следа (рис. 6, а, б).

Полученные результаты убедительно свидетельствуют об эффективности метода сканирования морской поверхности узким лазерным пучком для обнаружения изменения характеристик морского волнения под действием ГДВ в виде следа судна.

При обработке сигналов ФЯМ и АЛ рассчитывались средние значения по каждому двумстам сигналам АЦП, работающего при частоте оцифровки 10 кГц. На рис. 7, а, б изображены гистограммы амплитуд сигналов канала А на временных отрезках вне и в области пересечения следа БГК-889. Данные гистограмм свидетельствуют о смещении значений амплитуд сигналов ФЯМ в сторону малых значений при пересечении следа судна.

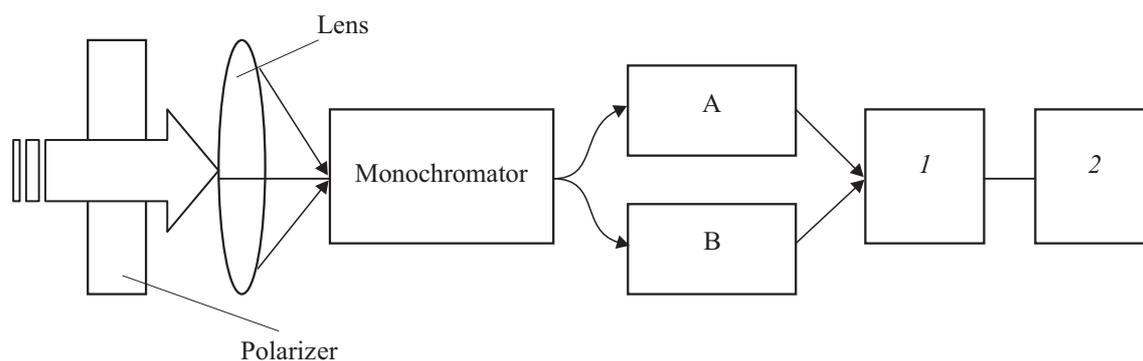


Рис. 3. Структурная схема фотометра яркости моря: А и В — фотоприемные устройства для регистрации сигналов на длинах волн 440 и 540 nm, 1 — аналого-цифровой преобразователь, 2 — персональный компьютер.



Рис. 4. Судно корабельного обеспечения БГК-889.

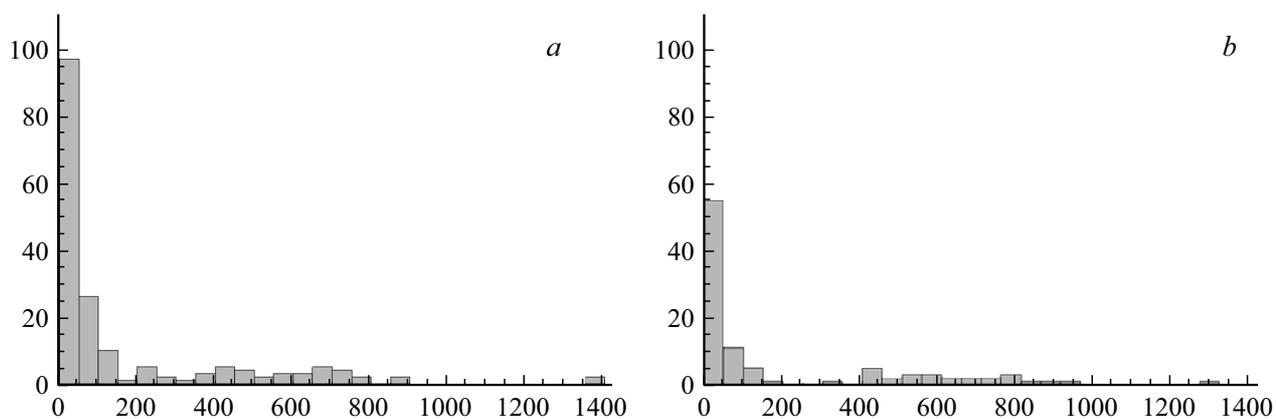


Рис. 5. Гистограммы временных интервалов между импульсами СЛЛ за 6 с до (а) и в момент пересечения следа (b).

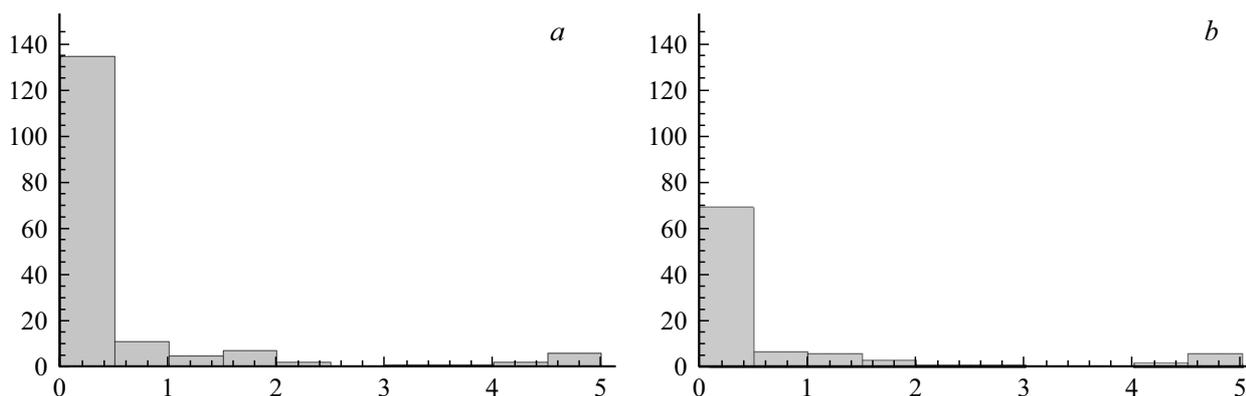


Рис. 6. Гистограммы амплитуд импульсов СЛЛ за 6 с до (*a*) и в момент пересечения следа (*b*).

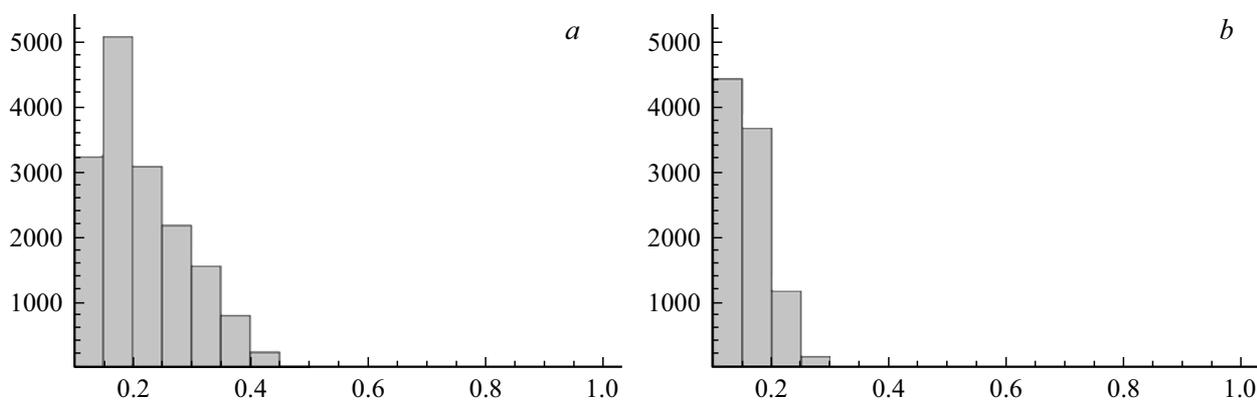


Рис. 7. Гистограммы амплитуд ФЯМ в канале А за промежуток времени 6 с вне следа (*a*) и при пересечении следа судна (*b*).

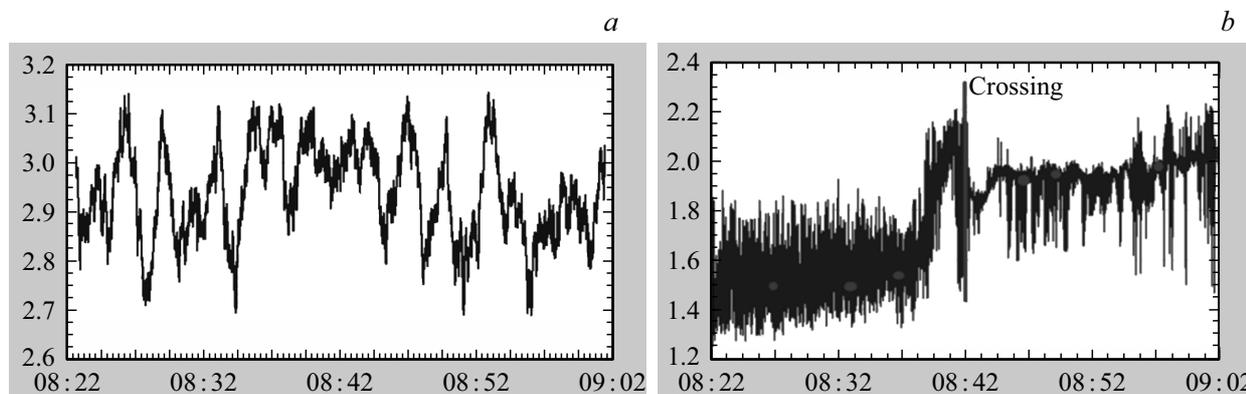


Рис. 8. Регистрограммы сглаженных амплитуд сигнала АЛ (*a*) и отношения яркостей моря I (ФЯМ) (*b*) при пересечении следа галсом продолжительностью 40 min (момент пересечения оси следа — 8 h 42 min).

Момент пересечения следа судна приборами ЛОА фиксировался не только на близких и коротких временных интервалах, но и при анализе сигналов на длительных участках трасс (галсов) носителя аппаратуры. На рис. 8, *a, b* показаны регистрограммы бегущих средних сигнала аэрозольного лидара и отношения I сигналов ФЯМ на длинах волн λ_1, λ_2 при следовании судном-носителем прямолинейным курсом в течение 40 min. Предполагаемый момент пере-

сечения следа располагался в середине пройденного участка.

Обоими приборами зафиксированы аномальные изменения в регистрограммах сигналов, произошедшие в момент пересечения предполагаемого следа судна (особенно это проявляется в параметре I сигналов ФЯМ). Важно отметить, что аномальные проявления отмечены приборами в одно и то же время, что повышает достоверность обнаружения следа судна.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования возможностей предложенных лазерно-оптических методов показали, что данные методы могут с успехом использоваться для дистанционной регистрации различных процессов, происходящих в толще океана по слабо-контрастным проявлениям на морской поверхности и приповерхностным слоям морской среды и атмосферы, а их совместное применение позволяет существенно повысить достоверность получаемых результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 320 с.
- [2] Оптика океана и атмосферы / Отв. ред. Шифрин К.С. М.: Наука, 1981. 230 с.
- [3] *Монин А.С., Краситский В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 336 с.
- [4] Оптика океана. Прикладная оптика океана. Т. 2 / Отв. ред. Монин А.С. М.: Наука, 1983. 263 с.
- [5] *Ермаков С.А., Капустин И.А.* // Изв. РАН ФАО. 2010. Т. 46. № 4. С. 565–570.
- [6] *Баханов В.В., Горячкин Ю.Н., Корчагин Н.Н., Репина И.А.* // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 111–115.
- [7] *Шилин Б.В., Шубина М.А.* // Геодезия и картография. 2000. № 9. С. 50–57.
- [8] Методы, процедуры и средства аэрокосмической компьютерной радиотомографии приповерхностных областей Земли / Под ред. Нестерова С.В., Шамаева А.С., Шамаева С.И., М.: Научный мир, 1996. 272 с.
- [9] Дистанционный контроль верхнего слоя океана / Орлов В.М., Самохвалов И.В., Белов М.Л. и др. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
- [10] Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов, Новосибирск: Наука, 1979.
- [11] Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / Беляев С.П., Никифоров Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
- [12] *Бу Ж., Хаймбах С.П., Хсу Ю.Л.* // Приборы для научных исследований. 1981. № 8. С. 120–126.
- [13] The Use of Laser Scanning Locators for the Study of Statistical Characteristics of Sea Waves / Nosov V.N., Pashin S.Yu., Zosimov V.V. et. al. // Laser Physics. 1993. V. 3. N 1. P. 209–213.
- [14] *Носов В.Н., Зосимов В.В.* // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1983. В. 17. С. 28–32.
- [15] *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 280 с.
- [16] *Nosov V.N., Gorelov A.M., Kaledin S.B., Kuznetsov V.A., Leonov S.O., Savin A.S.* // Dokl. Earth Sci. 2010. V. 433(1). P. 920–921.
- [17] *Nosov V.N., Kaledin S.B., Gorelov A.M., Leonov S.O., Kuznetsov V.A., Pogonin V.I., Savin A.S.* // Dokl. Earth Sci. 2012. V. 442(2). P. 247–248.
- [18] *Кельбалиханов Б.Ф.* Гидрооптические исследования в водах Мирового океана. Сыктывкар, 1992. 126 с.
- [19] *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Незлин Н.П., Соловьёв Д.М., Станичный С.В., Якубенко В.Г.* // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 344–356.
- [20] *Карабашев Г.С., Евдошенко М.А., Шеберстов С.В.* // Океанология, 2005. Т. 45. № 2. С.182-192.
- [21] *Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н.* // Океанология, 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.