

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 556

**Комплексный контроль состояния морских акваторий
оптическими методами. Часть 1. Концепция построения
многоуровневых измерительных систем для экологического
мониторинга прибрежных акваторий**

**Ю.Н. Кульчин¹, О.А. Букин¹, О.Г. Константинов², С.С. Вознесенский¹,
А.Н. Павлов¹, Е.Л. Гамаюнов¹, А.Ю. Майор¹, С.Ю. Столярчук¹,
А.А. Коротенко¹, А.Ю. Попик^{1*}**

*¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5*

*² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева (ДВО РАН)
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43*

Поступила в редакцию 30.11.2011 г.

Начинается публикация цикла работ, посвященных созданию технических средств и методик для оперативного и комплексного контроля состояния морских акваторий оптическими методами. Показана возможность применения многоуровневых измерительных систем для выполнения экологического мониторинга прибрежных морских акваторий. Приведены предварительные результаты мониторинга за разливами, образованными органическими пленками различных типов загрязнителей, выполненные посредством лидарной диагностики поверхности воды с помощью стационарных береговых систем видеонаблюдения. Показано применение погружаемых флуориметрических систем, позволяющих выполнять мониторинг морских вод в режиме реального времени. Обсуждается эффективность совместного применения указанных систем для мониторинга прибрежных акваторий.

Ключевые слова: флуориметр, лазерное зондирование, системы видеомониторинга, лидар; fluorimeter, laser sensing, video monitoring systems, lidar.

Введение

Одной из актуальных проблем прибрежных индустриальных регионов является проблема борьбы с загрязнением прилегающих акваторий. Возведение платформ добычи углеводородного сырья и нефтяных терминалов, прокладка нефтяных и газовых трубопроводов по дну морских акваторий, функционирование портовых служб и очистных сооружений — лишь небольшой перечень факторов, оказывающих сильное воздействие на экологическое состояние морских акваторий и водных бассейнов. Согласно Морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 г. одним из принципов национальной морской политики является «развитие систем мониторинга за

состоянием морской природной среды и прибрежных территорий». Экологическое состояние в прибрежных регионах определяется сильной связью и взаимодействием между атмосферой, водной акваторией и береговой территорией. Изучение такой связи требует проведения одновременных измерений многих параметров. С учетом большой площади акваторий выполнение таких измерений является очень трудоемким и времязатратным процессом.

Уменьшить трудоемкость и время измерений можно путем использования дистанционных методов. В настоящее время разработано множество дистанционных методов обнаружения загрязняющих веществ на поверхности воды. Преимущество дистанционных методов проявляется в оперативности регистрации факта загрязнения, определения его размера и координат еще на ранней стадии распространения, когда издержки на ликвидацию последствий могут быть сведены к минимуму. Через некоторое время, после того как загрязняющее вещество попало в морскую воду, происходит трансформация его физико-химических свойств, что приводит к значительному увеличению трудозатрат на очистку морской

* Юрий Николаевич Кульчин; Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Олег Григорьевич Константинов; Сергей Серафимович Вознесенский; Андрей Николаевич Павлов (anpavlov@iasp.dvo.ru); Евгений Леонидович Гамаюнов (gamaunov@iasp.dvo.ru); Александр Юрьевич Майор (mayor@iasp.dvo.ru); Сергей Юрьевич Столярчук; Алексей Анатольевич Коротенко; Александр Юрьевич Попик.

акватории. Бытовой мусор притапливается и становится трудноразличимым на морской поверхности. Нефтяная пленка, меняя свою толщину, распространяется на значительные площади морской акватории. По истечении нескольких суток пребывания в морской воде часть нефтепродуктов (до 30%) эмульгирует, образуя тяжелые оседающие агрегаты, часть — растворяется (до 5%) и только около 15% остается в мономолекулярном пленочном виде [1].

Увеличивают загрязнение и эвтрофикацию шельфовых вод речные стоки, несущие отходы промышленной и сельскохозяйственной деятельности человека, что также приводит к необратимым изменениям на экосистемном уровне. Усложняют анализ и контроль загрязнений поверхностные течения, мелко- и мезомасштабные вихри, которые перемешивают воды и частично способствуют маскированию и самоочищению акваторий. В связи с этим изучению поверхностной циркуляции вод в системе контроля состояния морских акваторий должно уделяться большое внимание.

Мониторинг морской поверхности в глобальных масштабах осуществляется спутниковыми сканерами (например, MODIS ИСЗ Aqua/Terra и AVHRR ИСЗ NOAA) и радиолокаторами с синтезированной апертурой (SAR ИСЗ ERS-2 и ASAR ИСЗ Envisat). Разрешающая способность ИК и оптических каналов сканеров морской поверхности спутников Aqua и Terra составляет 250 м — 1 км, поэтому с помощью этих инструментов могут быть обнаружены только большие по площади органические пленки и мезомасштабные вихревые структуры. Высокая стоимость радиолокационных снимков, полученных спутниками ERS-2 и Envisat, резко ограничивает круг пользователей этой информации. В основном только крупные нефтедобывающие компании могут позволить себе оплачивать спутниковый мониторинг подконтрольных им акваторий [2, 3]. Кроме того, относительно редкое покрытие спутниками контролируемой пользователем территории не позволяет эффективно использовать информацию для локализации начальной стадии загрязнения. Это же относится и к исследованиям динамики мелкомасштабных вихревых образований, характеризующихся нестационарностью, спонтанностью появления и малым временем жизни.

Малая разрешающая способность спутниковых измерений не позволяет их использовать для детального контроля поверхности в малых акваториях и вблизи берега. В таких случаях наиболее эффективным подходом при реализации систем мониторинга является применение многоуровневых систем, которые включают в себя дистанционные измерительные системы космического, наземного и судового базирования, а также погружаемые или прокачиваемые станции для прямого измерения физических параметров и состава воды *in situ*. Обладая полным набором измерительных средств в составе УСУ Центра коллективного пользования «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов мониторинга окружающей среды», нам удалось поставить ряд экспериментов по измерению па-

раметров, характеризующих состояние в прибрежных участках акватории.

Большое количество дистанционных методов обнаружения различного рода загрязнений основано на выявлении контраста между чистой и загрязненной морской поверхностью. В основе физических процессов, позволяющих в видимом диапазоне длин волн проводить регистрацию органических пленок на морской поверхности, лежит явление «выглаживания» водной поверхности за счет изменения коэффициента натяжения органическими пленками и гашения ими мелкомасштабной ветровой ряби. Сглаживающее влияние нефти наблюдается также при активной радиолокации водной поверхности в радиодиапазоне длин волн от 1,5 до 70 см [4, 5]. Такие «выглаженные» области часто называют сликами. Слики хорошо видны в видимом, инфракрасном и миллиметровом диапазонах длин волн. Видеосистемы наблюдения сликов в оптическом видимом диапазоне длин волн являются эффективным способом оперативного контроля прибрежных акваторий [6—11].

Разработанная в ДВО РАН панорамная система видеоконтроля морской поверхности начиная с 2006 г. работала на морской экспедиционной станции Тихоокеанского океанологического института. На рис. 1 приведено изображение морской поверхности, полученное 21 октября 2007 г. во время прохождения пограничного катера вблизи бухты Витязь. Белой линией обозначен маршрут судна. Светлая область на изображении морской поверхности вблизи маршрутной линии — слик от органической пленки загрязняющего вещества, вылившегося в воду в результате утечки с судна.

Такая видеосистема может быть использована в качестве первого уровня в системе комплексного контроля загрязнений морской поверхности органическими пленками в прибрежной области. Она позволяет обнаруживать слики, определять их координаты, прослеживать динамику изменения, а также изучать поверхностную циркуляцию вод.

Второй уровень оперативного контроля, в задачу которого входит идентификация органических соединений в органической пленке, может быть выполнен дистанционным методом с помощью мобильного флуоресцентного лидара. Такой лидар способен на расстоянии до 150 м от места установки (на берегу или на судне) уверенно зафиксировать спектр флуоресценции органического вещества, по которому при наличии базы данных эталонных спектров возможна идентификация органических соединений (например, определение типа нефтепродукта).

Для проведения экологического контроля акватории Амурского залива вблизи Владивостока авторами были проведены лидарные зондирования морской поверхности на расстоянии около 150 м от места установки лидара. Были получены спектры флуоресценции модельных разливов моторного масла, керосина, дизельного топлива, мазута и автомобильной тормозной жидкости. Эксперименты показали возможность уверенной регистрации спектров при отношении сигнал-шум выше 100 для исследованных типов разливов.

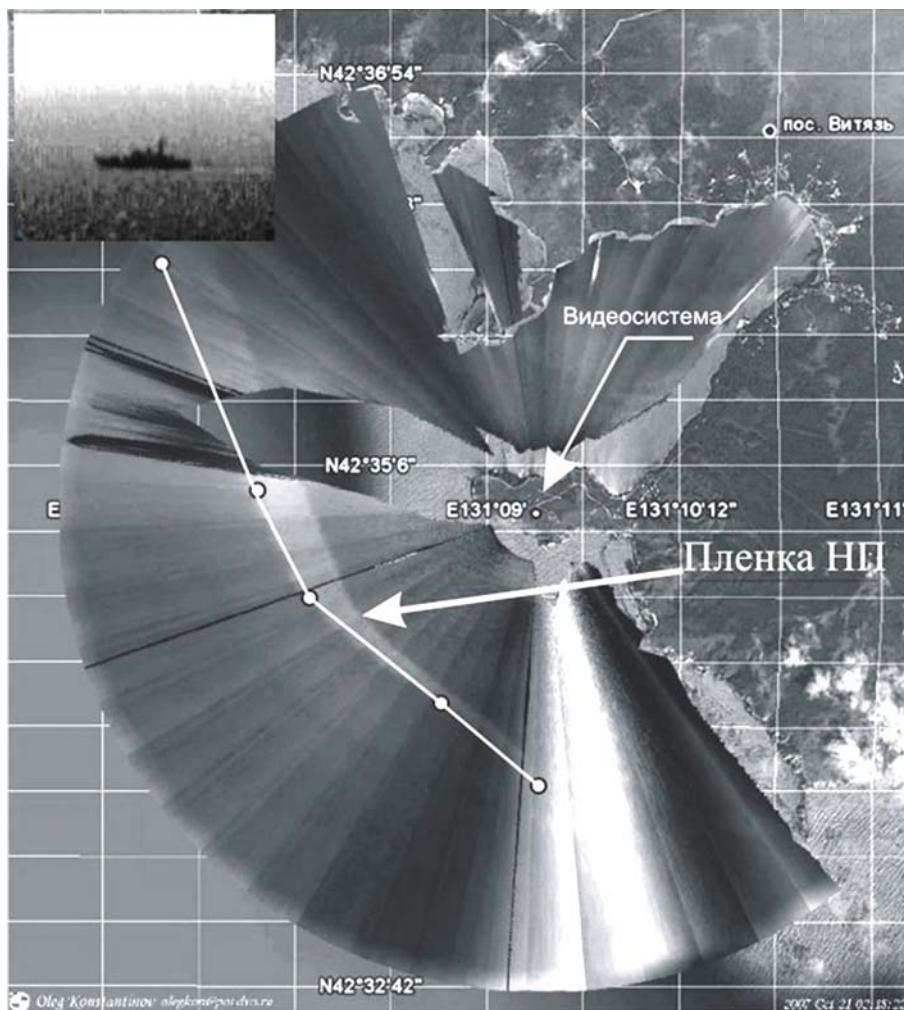


Рис. 1. Мониторинг морской поверхности видеосистемой

На рис. 2 приведены спектры флуоресценции исследованных нефтепродуктов и естественной органики в морской воде при зондировании на третьей гармонике NdYAG-лазера (355 нм), нормированные на максимум интенсивности.

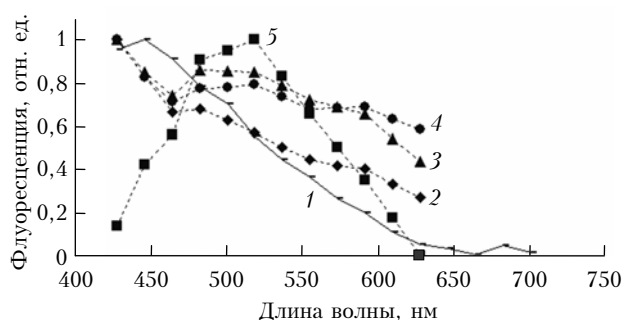


Рис. 2. Спектры флуоресценции нефтепродуктов на поверхности морской воды: 1 – морская вода; 2 – масло; 3 – керосин; 4 – солярка; 5 – тормозная жидкость

Максимумы полос флуоресценции нефтепродуктов расположены вблизи длины волны 500 нм. Интенсивность полос спадает для разных нефтепродуктов в красной области спектра с разной скоростью.

Этот факт показывает возможность разработки алгоритмов идентификации типа загрязнителя путем сравнения натурального спектра с базой спектров различных нефтепродуктов. Оценка толщины пленки может быть выполнена путем сравнения интенсивности рамановского сигнала от воды и сигнала флуоресценции [12].

Третий уровень контроля осуществляется с борта судна-лаборатории с помощью погружаемых или прокачиваемых измерительных систем. Попавшие в воду загрязнения оказывают влияние на развитие морских организмов и прежде всего на микроводоросли – фитопланктон, являющийся первым звеном в пищевой цепочке на Земле, от состояния которого зависит общее экологическое благополучие акватории. Часто величину концентрации фитопланктона используют как наиболее наглядный показатель «благополучия» водной среды. Наиболее распространенным и современным методом измерения концентрации является оценка быстрой флуоресценции фитопланктона [13]. Удобство применения флуоресцентного метода для измерения концентрации фитопланктона обусловлено тем, что флуоресцирующий пигмент – хлорофилл *a* светится в узком диапазоне длин волн 680–690 нм. Считается, что концентрация пигмента соответствует концентрации фитопланктона [14].

Имеющиеся на рынке приборы для измерения концентрации хлорофилла *a* (Sea Bird, Scufa, YSI, RBR и др.) позволяют производить замеры в широком диапазоне глубин. Но такие системы оказываются неточными при проведении измерений в акваториях вблизи устья рек и в прибрежных районах с развитой промышленностью. Это происходит вследствие наличия в воде большого количества примесей и растворенных органических веществ (РОВ), которые практически отсутствуют в океанических водах. Примеси и РОВ флуоресцируют в широком спектре частот и влияют на показания приборов.

Существенно уменьшить ошибку измерений можно при использовании широкополосного измерителя спектра флуоресценции [15, 16]. Впервые такой подход был реализован в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН при разработке спектрофлуориметра с прокачиваемой кюветой [17]. Впоследствии в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН такой спектрофлуориметр был дополнен погружаемым оптоволоконным модулем [18].

В 2011 г. на НИС «Импульс» был выполнен ряд экспедиций в район бухты Витязь (залив Петра Великого). В ходе этих экспедиций с помощью разработанного спектрофлуориметра с погружаемым модулем выполнялись измерения и строились графики зависимости от глубины: концентрации хлорофилла *a*, содержания РОВ и температуры. На рис. 3 показаны некоторые из графиков, полученных в разное время суток в ходе суточного мониторинга.

Экспедиционные исследования показали преимущества наблюдения концентрации веществ в толще воды в режиме реального времени. Например, флуоресцентные измерения концентрации хлорофилла *a* могут быть полезны для выявления глубин, с которых целесообразно взять пробы воды батометром для детальных исследований микроводорослей на видовой и пигментный состав. Разработанные спектрофлуориметры позволяют в дальнейшем реализовать методы измерения параметров фотосинтеза фитопланктона [19–21], что даст возможность оценивать степень воздействия различных загрязнителей на экологическое состояние акваторий.

Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет нам предложить построение многоуровневой системы мониторинга как системы, включающей в себя три измерительных уровня. *Первый* – спутниковый, предназначен для общей оценки состояния контролируемой акватории. *Второй* уровень – береговой, позволяет выявлять источники и состав загрязнений, а также строить прогнозы распространения загрязняющих веществ. *Третий* уровень – морской, на котором определяется биологическое состояние фитопланктона на разных глубинах его обитания. Получаемая информация на каждом измерительном уровне по-разному характеризует состояние водной толщи в точке измерения и с разной степенью точности. Интеграция получаемых данных позволяет выявить наиболее отличающиеся точки и области водной толщи с последующим проведением все более точных измерений, которые дают возможность максимально точно охарактеризовать состояние каждого конкретного района акватории.

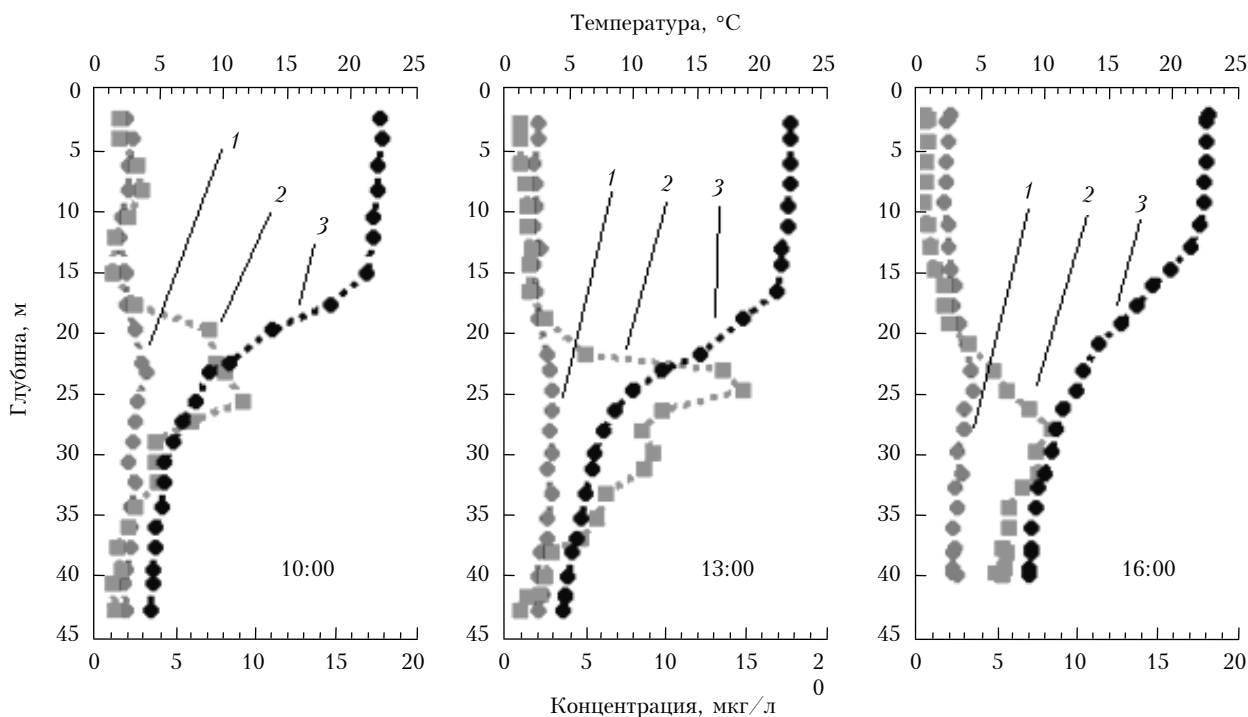


Рис. 3. Суточные изменения температуры и концентрации хлорофилла *a* и РОВ: 1 – распределение РОВ; 2 – распределение хлорофилла *a*; 3 – профиль температуры

Заключение

Комплексный подход в реализации многоуровневой системы мониторинга морских акваторий позволит обнаруживать район и масштабы загрязнения акваторий в кратчайшие сроки. Применение систем для анализа морских вод *in situ* даст возможность определить степень воздействия на окружающую среду непосредственно в процессе исследований. Это позволит своевременно принимать решения для поддержания и восстановления экологии прибрежных акваторий.

Исследования выполнялись на оборудовании, уникальных стендах и установках Центра коллективного пользования «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды» Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. Нельсон-Смит А. Загрязнение моря нефтью. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 50 с.
2. Обзор результатов мониторинга морского нефтяного месторождения «Кравцовское» (Д-6). Калининград: Изд-во ООО «Лукойл-Калининградморнефть», 2005. 48 с.
3. Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря. Отчет 2004. Калининград: Изд-во ООО «Лукойл-Калининградморнефть», 2005. 36 с.
4. Смирнов В.М. Обзор методов мониторинга водных поверхностей // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 35–42.
5. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // Четвертая Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тезисов конф. М.: ИКИ РАН, 13–17 ноября 2006 г.
6. Жуков Б.С. Поляризационная съемка нефтяных загрязнений водной поверхности // Многозональные аэрокосмические съемки Земли. М.: Наука, 1981. С. 175–188.
7. Филатов В.Н. Выбор параметров визирования телевизионной системы контроля загрязнения водной поверхности // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 43–47.
8. Обухова Н.А. Алгоритмы оценки загрязнения акватории // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 28–34.
9. Вилесов Л.Д. Инвариантное обнаружение нефтяных пленок на водной поверхности по спектральным признакам

в системе ТВ-наблюдений // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 56–60.

10. Тимофеев Б.С. Алгоритмы сегментации водной поверхности // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 18–23.
11. Астратов О.С. Обнаружение сликов телевизионными методами // Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. С. 48–55.
12. Patsayeva S., Yuzhakov V., Varlamov V., Barbini R., Fantoni R., Frassanito C., Palucci A. Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface // Proc. EARSel-SIG-Workshop LIDAR. Dresden/FRG, June 16–17, 2000.
13. Бауло Е.Н. Методы лазерной спектроскопии в исследованиях естественных вод // Научн. труды Дальрыбвтуза. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2009. С. 3–10.
14. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. Киев: Альтер-прес, 2002. 188 с.
15. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 976–983.
16. Букина О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Изменение спектров лазерно-индуцированной флуоресценции морской воды в процессе деградации растворенного органического вещества // Ж. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 1. С. 103–107.
17. Майор А.Ю., Букин О.А., Крикун В.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Компактный судовый флуориметр // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 283–285.
18. Бортовой измерительный комплекс параметров воды: Пат. 96662. Россия, МПК, G 01 N 21/01. Ю.Н. Кульчин, С.С. Вознесенский, Е.Л. Гамаюнов, А.А. Коротенко; Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук. № 2010110090/22; Заявл. 17.03.2010; Опубл. 10.08.2010.
19. Способ флуориметрического определения параметров фотосинтеза фотоавтотрофных организмов. Устройство для осуществления и измерительная камера: Пат. 2354958. Россия, МПК, G 01 N 21/64. А.Б. Рубин, С.И. Погосян, Д.Н. Магорин, Ю.В. Казимирко, Г.Ю. Ризниченко; ООО «Генная и клеточная терапия». № 2006132691/28; Заявл. 13.09.2006; Опубл. 10.05.2009.
20. WATER-PAM // Walz Mess- und Regeltechnik [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://walz.com/products/chl_p700/water-pam/flow_through_version.html
21. Schreiber U. Chlorophyll fluorescence: new instruments for special applications // Photosynthesis: Mechanisms and Effects. 1998. V. 5. P. 4253–4258.

Yu.N. Kulchin, O.A. Bukin, O.G. Konstantinov, S.S. Voznesenskii, A.N. Pavlov, E.L. Gamayunov, A.Yu. Mayor, S.Yu. Stolyarchuk, A.A. Korotenko, A.Yu. Popik. Complex monitoring of sea areas state by optical methods. Part 1. The idea of constructing the many-layer measurement systems for ecological monitoring of coastal waters.

This is the first in a series of papers devoted to the development of technical tools and techniques for rapid and comprehensive analysis of the ecological status of coastal waters by optical methods. The possibilities of multi-level measurement systems for carrying out environmental monitoring of sea areas are shown. Preliminary results of monitoring for spills of pollutants formed by different oil films are obtained with stationary coastal surveillance systems for lidar diagnostics of water surface. The application of the submerged fluorometric systems to monitor the marine waters in real time is presented. The efficiency of the combined use of these systems for monitoring coastal waters is discussed.