ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 528.88:[504.42+504.43/.45]:665.71:[001.891:378.4]
doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391

Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, проводимых в РГГМУ

П.П. Бескид, П.Ю. Богданов, В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова, Е.А. Чернецова, А.Д. Шишкин

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, tm-tatarn@yandex.ru

Представлены основные результаты исследований, полученные коллективом авторов в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности. Предложенная концепция автоматизированной распределенной системы дистанционного экологического мониторинга водной поверхности может быть применена в борьбе с последствиями нефтяных разливов, возникающих в результате экологических катастроф.

Ключевые слова: экологическая катастрофа, нефтяное загрязнение, водная поверхность, дистанционные методы, мониторинг, система экологического мониторинга, обнаружение аномалии, радарное изображение.

Results of research in the field of remote sensing methods for detecting oil pollution on the water surface conducted at the RSHU

P.P. Beskid, P. Yu. Bogdanov, V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova, E.A. Chernetsova, A.D. Shishkin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

The article presents the scientific results which are a generalization of almost twenty years of experience of the staff of the department of information technology and security systems of the Russian State Hydrometeorological University in the field of remote sensing methods of oil pollution on the water surface. The choice of radar systems for the implementation of remote monitoring of the water surface on the characteristics of efficiency and coverage of the area of responsibility is substantiated. Structurally, the radar monitoring system should consist of a network of centimeter and millimeter range radar systems. The use of centimeter-range radar systems is due to the preservation of their operability during intense precipitation. Millimeter-wave radar systems are characterized by higher radar contrast, which significantly increases the effectiveness of environmental monitoring of water areas, their performance depending on the weather conditions. Thus, a combination of radars of two ranges allows continuous monitoring of the water area in any weather conditions. Radar systems are a recording module as part of an object monitoring system. The facility monitoring system, in addition to existing systems at the regional level, allows to receive information on the environmental situation promptly. This is especially true in case of emergency situations that occur during loading and transportation of oil products and other environmentally hazardous substances.

The most significant result of many years of research is the concept of an automated distributed system for remote environmental monitoring of the water surface. For each module of the system, methods and models for processing spatial data and algorithms for the distribution of measuring instruments in the monitoring space are proposed. The purpose of the functioning of such a system is associated with detecting oil spills on the water surface, monitoring the dynamics of pollution and predicting the development of emergencies resulting from environmental disasters. International cooperation in the field of environmental protection is shown to be international in nature, the joint projects being an effective tool for development of scientific and educational potential of higher education in the field of ecology. Participation in international projects not only allows to increase the scientific and educational potential of higher education, but also influences the formation of environmental policy.

Keywords: environmental disaster, oil pollution, water surface, remote sensing, monitoring, environmental monitoring system, anomaly detection, radar image.

For citation: *P.P. Beskid, P.Yu. Bogdanov, V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova, E.A. Chernetsova, A.D. Shishkin.* Results of research in the field of remote sensing methods for detecting oil pollution on the water surface conducted at RSHU. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 60: 371—391. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391

Введение

Освоение месторождений полезных ископаемых, прежде всего нефтяных месторождений, и строительство нефтегазопроводов являются важнейшей частью государственной стратегии развития экономики России. Возникающие при этом экологические, технические и социальные проблемы связаны с обеспечением безопасности как самих дорогостоящих сооружений по добыче полезных ископаемых, так и окружающей среды [1].

Размеры сооружений по добыче полезных ископаемых весьма велики, и они рассчитаны на длительный срок эксплуатации, что увеличивает вероятность их повреждения за счет природных явлений. Нельзя исключать возможность как умышленных повреждений трубопроводов (теракты), так и непреднамеренных воздействий людей в процессе их деятельности (рыболовство, судоходство и др.).

В соответствии с Федеральным законом №331-ФЗ от 21.11.2011 г. в России создана единая государственная система экологического мониторинга. В нее включены все существующие виды мониторинга охраны окружающей среды [2]: атмосферного воздуха, лесов, земель, недр, водных объектов, животного и растительного мира, охотничьих и водных биоресурсов, внутренних морских вод и территориального моря, исключительной экономической зоны и континентального шельфа. Главные задачи единой системы экологического мониторинга включают:

— непрерывные регулярные наблюдения за состоянием окружающей среды;

— хранение, обобщение и анализ собранной информации;

— своевременное выявление изменений состояния окружающей среды, их оценку и прогноз.

Согласно упомянутому закону каждая компания (или группа компаний) должна выработать единую стратегию экологической безопасности и комплексного мониторинга природной среды, руководствоваться ею в своей повседневной

деятельности и на перспективу. Система должна быть ориентирована, прежде всего, на прогнозирование нежелательной ситуации, а не реагирование на уже сложившуюся обстановку.

Решение указанной проблемы представляет актуальную научно-практическую задачу, согласующуюся с Экологической доктриной Российской Федерации, принятой распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. № 1225-р, Концепцией устойчивого развития, переход к которой провозглашен на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 1992 г., а также решениями Всемирного саммита в Йоханнесбурге, принятыми в сентябре 2002 г.

Негативное воздействие загрязнения на окружающую среду носит комплексный характер, что требует совершенствования методов и инструментов проведения непрерывных во времени наблюдений, а также новых моделей и алгоритмов обработки мониторинговых данных с целью предупреждения экологических катастроф [3].

В статье приводятся основные результаты, полученные коллективом кафедры информационных технологий и систем безопасности, которая вот уже порядка двадцати лет занимается научными изысканиями в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Дистанционные методы являются инструментальным способом наблюдения за каким-либо процессом, явлением или объектом, при котором измерительный датчик находится на некотором расстоянии от изучаемого объекта. С развитием беспроводных сетей связи, интернета вещей, геоинформационных систем применение дистанционных методов в решении экологических задач получило второе дыхание.

Идеи, лежащие в основе дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности

Комплексное исследование окружающей среды охватывает широкий диапазон методов. В мониторинге морских акваторий и прибрежных зон нашли применение фотографические, телевизионные, спектральные, лидарные, тепловые, радиолокационные и другие виды наблюдения, которые проводятся с наземных, судовых, аэрокосмических и других носителей [4, 5].

Наряду с глобальными и региональными системами важное значение имеют системы объектового мониторинга акваторий и прибрежных зон. Зона ответственности действия систем объектового мониторинга существенно меньше региональных, но их роль неоценима для получения оперативной информации об экологической обстановке в случае аварийных ситуаций, возникающих при загрузке и транспортировке нефтепродуктов и других экологически опасных веществ [6].

Зона ответственности — это участок акватории и прибрежной зоны с определенными границами, в пределах которого производится мониторинг. В портовых акваториях радиус зоны ответственности составляет порядка 10 км с центром на терминале.

Для создания комплексной системы экологического мониторинга акватории анализируются особенности акватории, выделяется круг задач, оцениваются возможности их решения на основе существующей и перспективной материально-технической базой. По результатам анализа создается информативно-ситуационная матрица, позволяющая определить перспективные средства наблюдения и контроля (табл. 1).

Таблица 1

Информационно-ситуационная матрица средств наблюдения и контроля

Information-situational matrix of means of observation and control

Физическое поле	Тип чрезвычайных ситуаций					
	Разлив нефтепродуктов	Выбросы в атмосферу	Загрязнение вод промышленными стоками	Радиационное загрязнение	Пожары	Землетрясения
Электромагнитное	Да	Да	Нет	Да	Нет	Нет
Оптическое	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет
Инфракрасное	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Акустическое	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Гидроакустическое	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Сейсмоакустическое	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Контактные измерения	Да	Да	Да	Да	Да	Нет

Объектовая система экологического мониторинга акватории призвана решать следующие задачи:

— дистанционное обнаружение загрязняющих выбросов (разливов нефти) на водную поверхность;

— определение (радиофизическими, физико-химическими и другими средствами и методами) типа, состава, координат и размеров загрязнений;

— контроль динамики загрязнений (развитие, перемещение и т. п.);

— объединение данных, полученных с помощью различных технических средств;

— прогнозирование развития чрезвычайной ситуации с использованием данных о гидрологических и метеорологических условиях, ледовой обстановке с применением математического моделирования и проигрывания ситуаций.

В состав комплексной системы экологического мониторинга акватории могут входить как активные и пассивные дистанционные системы наблюдения (рис. 1), так и контактные подсистемы физико-химического анализа [7, 8].

Управление всеми подсистемами производится центральным процессором. Процессор выполняет совместную обработку разнородных данных: анализ радиолокационных сигналов и изображений, полученных с различных ракурсов на участке акватории; оптических изображений от сети телекамер; тепловых портретов акватории от сети инфракрасных телекамер; портретов акватории, полученных лазерными локаторами; результатов обработки сейсмоакустических, гидроакустических сигналов; физико-химических проб воды; метеорологических

Рис. 1. Классификация источников информации в системе экологического мониторинга акватории.

Fig. 1. Classification of information sources in the water area environmental monitoring system.

условий. По результатам совместного анализа формируется заключение о наличии или отсутствии загрязнений на контролируемом участке акватории, о количестве и качественном составе загрязняющих веществ. Заключения транслируются службам предотвращения и ликвидации загрязнений.

Дистанционные методы с учетом их оперативности и охвата зоны ответственности представляют наибольший интерес. К ним относятся пассивные методы зондирования (радиотеплолокационные, телевизионные) и активные радиолокационные методы зондирования. В свою очередь, благодаря возможности использования при любых метеорологических условиях распространение получили методы активного зондирования водной поверхности, основанные на использовании оптических систем (лидаров) и радиолокационных систем (РЛС) [9].

Лидары осуществляют контроль за состоянием водной поверхности при помощи оптического зондирования импульсными или непрерывными световыми потоками [5].

Радиолокационные системы предназначены для всепогодного дистанционного мониторинга водной поверхности в зоне ответственности. РЛС позволяют

решать задачи: оценки основных характеристик и параметров волнения и течений на водной поверхности; обнаружения льдин и других объектов, мешающих судовождению; распознавания аномалий, например загрязняющих выбросов (разливов нефти) на водную поверхность; определение координат и масштабов загрязнений, контроль их динамики [10].

Структурно РЛС мониторинга должна состоять из сети РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Использование РЛС сантиметрового диапазона электромагнитных волн (1—10 см) обусловлено сохранением их работоспособности при интенсивных осадках. Потери при распространении сигнала для них на трассе с ливневым дождем не превышают 10 дБ на дальности порядка 10 км, что вполне приемлемо с практической точки зрения. РЛС миллиметрового диапазона волн (0,8—8 мм) характеризуются более высокой (на 10 дБ и более) радиолокационной контрастностью (отношение интенсивности отражения чистой и грязной воды) по сравнению с РЛС сантиметрового диапазона, что значительно повышает эффективность экологического мониторинга акваторий. Однако их работоспособность зависит от метеоусловий. В отсутствии интенсивных осадков РЛС миллиметрового диапазона предпочтительнее РЛС сантиметрового диапазона для заданной зоны ответственности. Таким образом, комбинация из РЛС двух диапазонов может обеспечить непрерывный контроль акватории в любых погодных условиях.

Радиолокаторы располагаются в прибрежной зоне, прилегающей к акватории. Наземное расположение радиолокаторов обусловливает малые углы облучения водной поверхности относительно горизонта, что приводит к снижению радиолокационного контраста. Повышение радиолокационного контраста реализовывалось увеличением энергопотенциала радиолокатора за счет доведения средней мощности излучения передатчика до 20—30 Вт [7].

Мощность отражения от водной поверхности и радиолокационный контраст загрязнений возрастают с увеличением угла скольжения. Поэтому с целью повышения эффективности экологического мониторинга акватории антенны радиолокаторов следует устанавливать на максимально возможной высоте, используя естественные возвышенности и специальные мачты или вышки.

Обнаружение и контроль нефтяных пленок производится автоматическими средствами и оператором — лицом, принимающим решения (ЛПР), анализирующим наблюдаемые на мониторах радиолокационные изображения участков зоны ответственности. Необходимость привлечения ЛПР наряду с высокоэффективными техническими средствами обусловлена важностью задачи и высокой ответственностью за принимаемые решения.

Общий вид автоматизированной распределенной системы дистанционного экологического мониторинга водной поверхности, развиваемой авторским коллективом кафедры, приведен на рис. 2.

Для всех модулей системы предложены новые модели и методы обработки пространственных данных, в том числе монохромных изображений объектов мониторинга, созданы и усовершенствованы алгоритмы распределения измерительных средств в пространстве мониторинга.

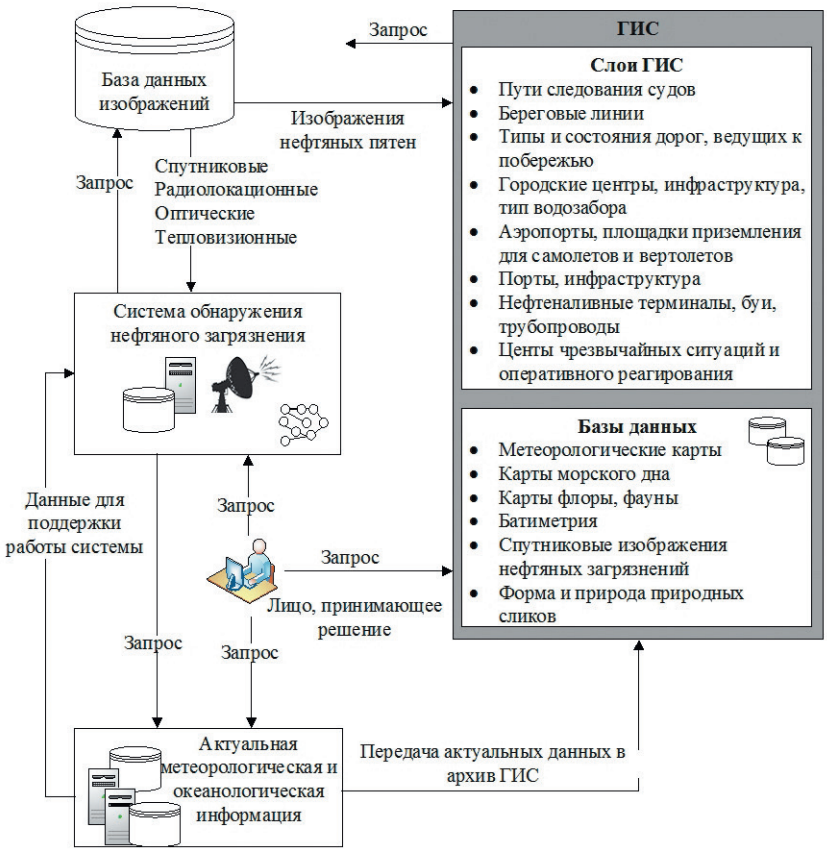

Рис. 2. Схема автоматизированной системы дистанционного мониторинга водной среды.

Fig. 2. Scheme of an automated system for remote monitoring of the aquatic environment.

Обобщение результатов, полученных в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности

Первая научно-исследовательская работа (НИР), с которой начались исследования в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, была выполнена в 2003 г. (ГР № 01 2003 15898) на тему «Натурные экспериментальные исследования дистанционных методов обнаружения неоднородностей и загрязнений прибрежных акваторий». Основная идея результатов, полученных в работе, заключается в том, что по параметрам оптических и инфракрасных сигналов, отраженных от морской поверхности, можно определить параметры и характеристики техногенных аномалий [11].

Натурные эксперименты проводились с использованием измерительного комплекса РИК-М (рис. 3).

Рис. 3. Измерительный комплекс.

Fig. 3. Measuring complex.

Визуальное сопровождение объекта мониторинга обеспечивалось телевизионным каналом и системой управления антенной по азимуту. В телевизионный канал включались камера наружного наблюдения и плата видеозахвата, входящая в системный блок компьютера. Система управления поворотом антенны по азимуту состояла из привода и блока управления приводом. Скорость поворота антенны регулировалась в пределах от 1 до 90° в секунду, а угол поворота задавался областью сканирования пространства.

Регистрация отраженного от морской поверхности радиолокационного сигнала осуществлялась цифровым осциллографом, конструктивно выполненным в виде платы расширения компьютера. Цифровой осциллограф на тот момент был значимым научным результатом, полученным коллективом кафедры, можно сказать, ноу-хау, позволившим на выходе радиолокационного комплекса получать оцифрованное монохромное изображение.

Результаты натурных экспериментов по зондированию прибрежных акваторий Финского залива и Ладожского озера свидетельствовали о том, что наземные радиолокационные дистанционные методы являются эффективным средством определения различного вида загрязнений акваторий, в том числе нефтепродуктами, антропогенного и естественного происхождения [7]. Методика проведения эксперимента, предложенная в работе, не имеет аналогов и в настоящее время, так как учитывает выбор и настройку специального измерительного оборудования, метеорологические условия, планирование периодичности измерений.

Далее в 2004 г. в рамках проекта № Э/3223 ФЦП «Интеграция» были продолжены эксперименты по аэрофотосъемке загрязнений акваторий с использованием существующих на тот момент системам дистанционного зондирования. Эксперименты с перспективными системами, в первую очередь видеоспектральной аппаратурой видимого диапазона, способствовали накоплению статистических данных для более точной идентификации различного рода загрязнений, обусловленных антропогенными воздействиями.

В 2005 г. уже в рамках научно-исследовательской работы «Радар» (ГР № 01.20050354) предложены новые метод и алгоритм обработки радиолокационных изображений, фиксирующих отражения от морской поверхности. Источники изображений — активные и пассивные радары, установленные на спутниках Земли [3]. Метод базируется на локальных градиентах, вычисленных с помощью алгоритма обработки изображений.

Разработанный метод решает задачу детектирования нефтяных загрязнений на монохромном радарном изображении и состоит из трех этапов [11]:

— обнаружение темного объекта на изображении;

— оценка основных геометрических и физических характеристик темного объекта;

— классификация темного объекта как нефтяного загрязнения или природного слика.

Классификатор представляет собой нейронную сеть [12—15]. Для ее обучения авторами впервые предложено множество параметров, описывающих темный объект изображения:

— размер области A, на которой наблюдается объект (км^2);

— периметр P границ объекта (км);

— сложность, определяемая как $C = P/2\sqrt{\pi A}$; обычно принимает малые численные значения для районов с простой геометрией и большие значения для сложных геометрических районов;

— протяженность S; вычисляется с помощью метода главных компонент векторов, составляющими которых являются координаты пикселей, принадлежащих объекту; если λ_1 и λ_2 являются двумя собственными числами, связанными с вычисляемой матрицей ковариации и $\lambda_1 > \lambda_2$, то значение протяженности $S = 100\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$;

— стандартное отклонение значений интенсивности пикселей, принадлежащих темному объекту (дБ);

— стандартное отклонение значений интенсивности пикселей, принадлежащих району, окружающему темный объект (дБ);

— различие между средним значением интенсивности пикселей фона и самым малым значением интенсивности пикселей вне темного объекта (дБ);

— различие между средним значением интенсивности пикселей фона и средним значением интенсивности пикселей темного объекта (дБ);

— максимальный граничный градиент фон — объект (дБ);

— средний граничный градиент фон — объект (дБ);

— стандартное отклонение значений граничного градиента (дБ).

Автоматизация процесса классификации изображений позволила повысить качество характеристик обнаружения загрязнения на водной поверхности. Классификатор прошел апробацию, с его помощью было выявлено (подтверждено) несколько аномалий водной поверхности, типичные примеры которых приведены на рис. 4 и 5 [14].

На рис. 4 представлено изображение, где отмечена зона с темными полосами. Наличие темных областей вызвано небольшими ветрами, в результате чего поверхность моря становится менее шероховатой и отражает все падающие излучения. В нижней части изображения, у подножия Куршской косы, отчетливо видны аномалии, вызванные естественными пленками, образовавшимися в результате жизнедеятельности планктона и рыб. Природные пленки полезны для обнаружения циркуляции поверхностных течений, но легко разрушаются при скорости ветра более 7 м/с.

На рис. 5 приведено изображение восточной части Финского залива и Ладожского озера. Белая область, покрывающая большую часть озера, классифицируется как нерастаявший лед.

Рис. 4. Выявленная аномалия «природный слик».

Fig. 4. Identified anomaly “natural slick”.

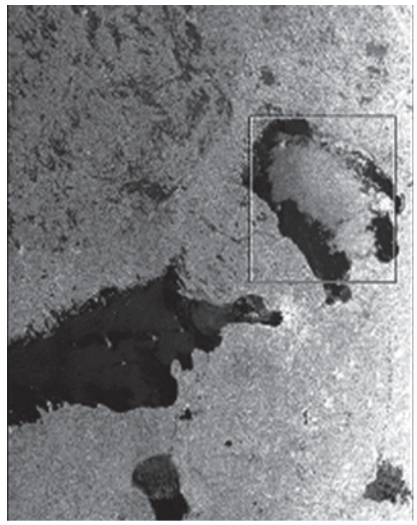

Рис. 5. Выявленная аномалия «нерастаявший лед».

Fig. 5. Identified anomaly “not melted ice”.

Алгоритм детектирования нефтяных загрязнений в некоторой степени универсален и может быть применен ко многим изображениям, полученным со спутников RADARSAT-1, ScanSAR и European Remote sensing Sattelite SARs.

В соответствии с планом ЛенМорНИИпроекта о проектировании портовых сооружений действующих и новых портов результаты НИР «Радар» были включены в систему экологического мониторинга акваторий портов, в частности для контроля акватории порта Санкт-Петербург и нефтеналивного терминала порта г. Приморска Ленинградской области. Полученные в результате исследований данные оказались пригодны для тиражирования при разработке систем экологической защиты других отечественных и зарубежных портов.

Результаты НИР «Радар» и в настоящее время используются в учебных дисциплинах «Дистанционные методы исследования Мирового океана», «Морские информационные системы», «Мониторинг окружающей среды» для специальностей и направлений обучения Российского государственного гидрометеорологического университета, а также других университетов, осуществляющих подготовку специалистов в области систем мониторинга окружающей среды и объектов. Кроме того, полученные в ходе исследований статистические данные и разработанные модели представляют собой качественный материал для организации дистанционного обучения студентов и слушателей по использованию физико-математического моделирования реальных процессов и объектов мониторинга с использованием реальных данных.

В 2006 г. при выполнении научно-исследовательской работы «Исследование природных и техногенных аномалий для оценки экологической обстановки

в морских акваториях радиолокационными методами» (шифр «Аномалия», ГР № 01 2006 03267) предложены модели морской поверхности при наличии и при отсутствии на ее поверхности природных и техногенных аномалий.

Основным техногенным загрязнителем морской поверхности являются разливы нефти и ее продуктов, в результате которых образуется нефтяная пленка, влияющая на отражающие свойства морской поверхности. Для выявления механизма влияния пленки на отражающие свойства морской поверхности использовано понятие «радиолокационного контраста», при котором сравниваются эффективные площади рассеяния чистой и загрязненной водной поверхности. Степень загрязнения морской поверхности оценивается по величине логарифмического радиолокационного контраста, измеряемого в децибелах [16].

Анализ проводился для двух видов пленки: тонкой (нерастворимой) и толстой (вязкой). Конкретные теоретические расчеты радиолокационного контраста проведены для нефтяной пленки с параметрами, близкими к параметрам нефти месторождения «Нефтяные камни» [17]. В результате выполненных исследований впервые получены зависимости контраста от длины поверхностной волны для различных значений поверхностной активности вещества.

В рамках выполненных исследований предложены новые модели нефтяного загрязнения морской поверхности в следующих диапазонах длин волн излучаемого сигнала:

— от 4,2 до 8,8 см, где представлены зависимости радиолокационного контраста от длины поверхностной волны для различных значений поверхностной активности загрязняющего вещества, а также толщины вязкого волнового слоя в нефти от длины поверхностной волны. Показано, что влияние толщины пленки должно проявляться сильнее с уменьшением длины поверхностной волны;

— от 2 до 3 см, где предложено описывать нефтяные пятна простых форм — линейные и круглые. Моделирование сигнала энергии обратного рассеяния показывает, что наиболее сильные искажения формы сигнала ожидаются на границах сред нефтяное пятно — поверхность воды. Эти искажения сопровождаются флуктуациями угла отклонения от надира. В этом случае невозможно получить достоверные геофизические параметры наблюдаемого объекта;

— от 0,6 до 1 см, где модель основана на измерении яркостной температуры излучения загрязненной области, которая определяется эмиссией из водного слоя, слоя нефти, а также излучением атмосферы, отраженным от границ нефтяного пятна. В результате интерференции этих сигналов наблюдаемая яркостная температура излучения от поверхности нефтяного пятна на водной поверхности периодически изменяется при изменении толщины нефтяной пленки [18]. Сравнение яркостных температур областей нефтяного загрязнения и поверхности чистой воды делает возможной оценку толщины пленки в точке загрязнения.

Предложенные в работе модели впервые получили распространение для обоснования и создания современных всепогодных дистанционных систем воздушного, морского и наземного базирования для оперативного исследования параметров морской среды — волнения, солености, ледовой обстановки и др.

В 2007—2009 гг. при выполнении НИР «Исследование экологического состояния морской поверхности прибрежных зон с использованием многосенсорных систем, основанных на различных физических принципах» (шифр «Лидар», № ГР 01200952634) получены значимые результаты в части обработки сигналов датчиков в свободно дрейфующей подсистеме мониторинга. На рис. 6 приведен общий вид распределенной многосенсорной системы мониторинга экологической обстановки.

В ходе исследований, проведенных в рамках НИР «Лидар», предложены алгоритмы оптимального расположения датчиков в распределенной многосенсорной сети мониторинга.

• Определение оптимального расположения гетерогенных сенсоров в сети мониторинга с точки зрения полного покрытия зоны ответственности зонами чувствительности датчиков. На рис. 7 иллюстрируется постановка данной задачи. В сети мониторинга имеется n гетерогенных сенсоров. Гетерогенность сенсоров выражается в том, что зона их чувствительности различна по форме и по охватываемой площади зоны ответственности. В такой сети мониторинга могут быть участки зоны ответственности, не попавшие в зону чувствительности ни одного сенсора [19].

• Определение оптимального расположения сенсоров в сети мониторинга с точки зрения оптимизации информационных потоков в сети мониторинга. Рисунок 8 иллюстрирует постановку данной задачи — два возможных варианта организации трафика в сети мониторинга. Сенсоры A1 и B1 передают данные по более короткому пути, чем сенсоры A2 и B2, но сенсор B2 может использовать корреляцию между сигналами A2 и B2, чтобы кодировать свои данные совместно с данными сенсора A2 и, следовательно, оптимизировать информационный поток в сети мониторинга. Таким образом, сокращается избыточность в данных, пере-

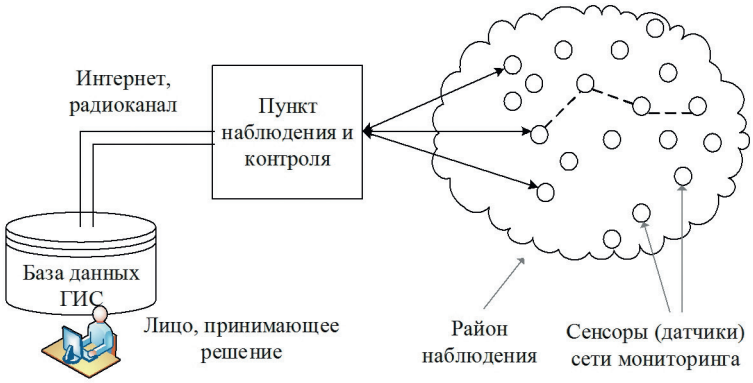

Рис. 6. Общий вид распределенной многосенсорной системы мониторинга экологической обстановки.

Fig. 6. General view of a distributed multisensor system for monitoring the environmental situation.

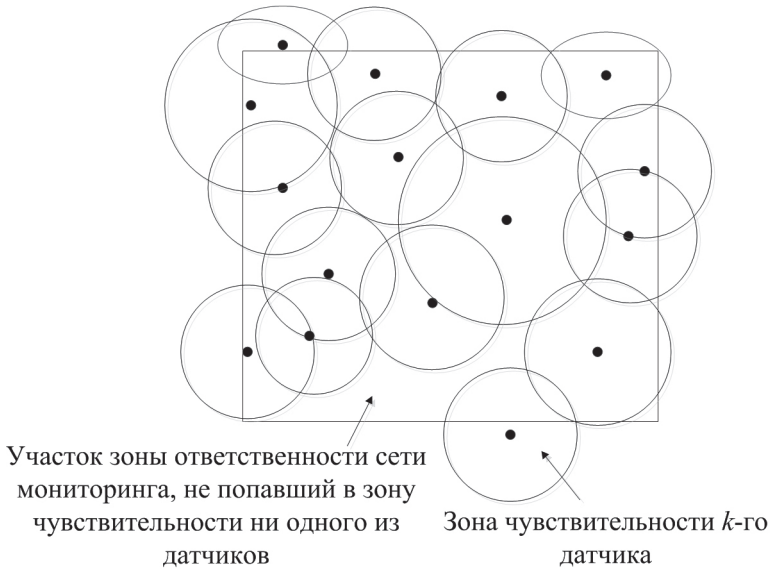

Рис. 7. Зона ответственности и зоны чувствительности датчиков в сети мониторинга.

Fig. 7. Area of responsibility and areas of sensitivity of sensors in the monitoring network.

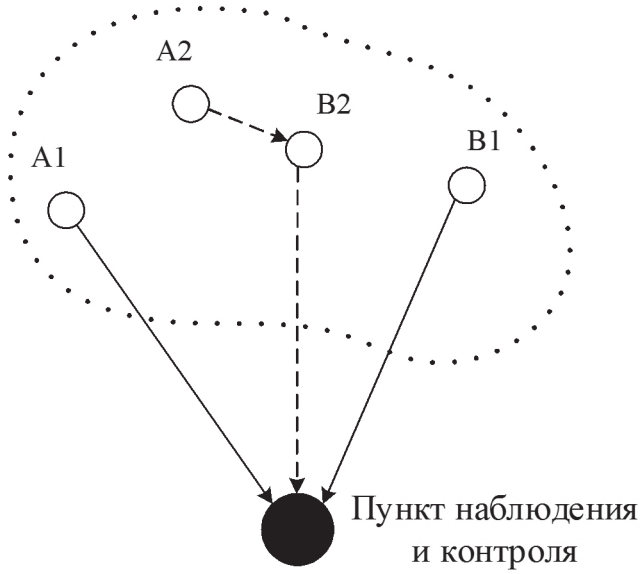

Рис. 8. Два возможных варианта организации трафика в сети мониторинга.

Fig. 8. Two possible options for organizing traffic in the monitoring network.

даваемых по каналу связи от сенсоров к пункту наблюдения и контроля, минимизируются потери энергии на датчиках, что оптимизирует время жизни свободно дрейфующей подсистемы мониторинга [20].

Для разработки обоих алгоритмов оптимизации были использованы инструментарии интегральной геометрии и теории вероятности [21].

Научная значимость разработанных алгоритмов состоит в описании вероятностной модели зоны покрытия сети мониторинга, а также определении оптимального числа датчиков в многосенсорной распределенной сети мониторинга в случае сильной корреляции между сигналами сенсоров, описываемой квадратичной корреляционной моделью. Практическая ценность заключается в возможности реализации предложенных алгоритмов в распределенных протоколах управления сетью мониторинга и относительно небольших вычислительных затратах, полиномиально возрастающих с увеличением числа сенсоров в сети мониторинга.

Развитие исследований в рамках НИР «Лидар» позволило обобщить результаты, полученные коллективом авторов в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности. Многолетние исследования увенчались созданием системы поддержки принятия решений (СППР) — специализированного интеллектуального интегрированного вычислителя и редактора текстовых, графических и табличных документов. Основные функции управления и способы их поддержки решены на базе современных информационных технологий. Единое информационное пространство СППР представляет собой иерархическую систему самораскрывающихся электронных документов и сопряженных с ними листов электронной карты, отражающей организацию процесса построения модели оперативно-тактической обстановки в зоне ответственности многосенсорной системы дистанционного мониторинга водной поверхности.

Международное сотрудничество РГГМУ в исследовании дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности

Начало сотрудничеству РГГМУ по проблемам загрязнения и экологии окружающей среды со странами Европейского Союза (ЕС), имеющими общие водные границы с Россией, было положено в 2000 г. при реализации проектов по проблемам экологии Финского залива.

Содействие со стороны стран ЕС по вопросам окружающей среды в основном оказывалось по программам ТАСИС.

Первый проект ECOTECH по приграничному сотрудничеству в 2000 г. начался с организации российско-финского семинара «Защита окружающей среды с получением прибыли». Основным партнером с российской стороны стал Комитет по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга, с финской стороны — администрация региона Пайат-Хаме, которая выступила в качестве бенефициария проекта.

В процессе семинара было достигнуто взаимопонимание с финскими партнерами и составлен план дальнейших совместных исследований. Для реализации

этого плана в Европейскую комиссию была подана заявка на малый проект программы ТАСИС по приграничному сотрудничеству. На основании этой заявки был получен грант ЕС на выполнение проекта ECOTECH-2: Научно-техническое сотрудничество университетов, малых и средних предприятий в области защиты окружающей среды (Co-operating in Environmental R&D in SME-Field TSPF/0302/0038), начало проекта — ноябрь 2002 г, продолжительность проекта — 1,5 года. Главная цель проекта — улучшение экономических и экологических условий в приграничном регионе. Результаты проекта предназначались к использованию в странах ЕС и СНГ. Группы населения, заинтересованные в результатах проекта — властные структуры, отвечающие за экологию, университеты, научно-технологические центры и малые предприятия, занимающиеся исследованиями и обучением в области экологии, жители региона.

Далее в 2005 г. в рамках исследовательского проекта Евросоюза «Remote monitoring of oil spills the coastal area Contract» No.: Tacis CBC Project N 2005/100-731, реализованного РГГМУ совместно с Королевским университетом г. Стокгольма, была выполнена работа по разработке и апробации прототипа системы дистанционного обнаружения нефтяных разливов. В проекте предлагалось применение модернизированных радиолокационных станций берегового и судового базирования для мониторинга экологической обстановки в прибрежных акваториях, а именно обнаружение и идентификация нефтяных разливов. Исследовательский проект Евросоюза явился, таким образом, развитием разработки прототипа системы автоматического обнаружения нефтяных разливов (см. рис. 2), проверки полученной информации, оценки количества сброшенного загрязнителя и обеспечения очистки воды.

Целью данного совместного проекта стала разработка принципов функционирования и построения специализированных радиолокационных систем наземного базирования для экологического мониторинга акваторий нефтеналивных портов.

Экспериментальная апробация основных теоретических предпосылок путем периодического наблюдения морской акватории проводилась в районе г. Приморска Ленинградской области. Для проведения этого эксперимента было получено разрешение Комитета по экологии г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Многообразие погодных условий определяло необходимость использования радиолокаторов двух частотных диапазонов — миллиметрового и сантиметрового — с возможностью оперативного подбора состава и параметров аппаратуры. Для подавления отражений от гидрометеоров стало целесообразным оперативное изменение поляризации излучения и приема. Смена поляризации антенны, а тем более использование антенн с разной поляризацией для передачи и приема были доступны без особенных технических и экономических издержек только при береговом базировании.

Использование станций миллиметрового диапазона сдерживалось зависимостью их работы от погодных условий. Поэтому в проекте использовался серийный радар сантиметрового диапазона «FURUNO FR-7062». Радиолокационный пост, установленный в месте проведения экспериментов, представлен на рис. 9.

Рис. 9. Установка антенны РЛС Furuno FR-7062 в г. Приморске.

Fig. 9. Installation of the radar antenna Furuno FR-7062 in Primorsk.

Первичная обработка радиолокационных сигналов включала:

— длительное накопление сигналов для получения контрастных радиолокационных изображений,

— логарифмирование амплитуд принимаемых сигналов,

— режекцию неизменных элементов изображения,

— аналого-цифровое преобразование сигнала.

Все перечисленные алгоритмы являются авторскими. Модуль аналого-цифрового преобразования разработан лабораторией «НИИ «Прогноз», работавшей в 2002—2010 гг. при РГГМУ. Преобразователь выполнен на базе сигнального процессора. Интерфейс модуля сопрягается с выходом радара. Программное обеспечение модуля дополнено системой dKart Navigator — программами для работы с электронной картографией, которая является эквивалентом навигационных карт, соответствующих требованиям Конвенции по охране человеческой жизни на море.

Определение наличия нефтяной пленки на морской поверхности осуществлялось на основе различия радиолокационного контраста. Различия связаны с частичным гашением волнения в пределах нефтяного пятна из-за большего по сравнению с чистой водой поверхностного натяжения нефтяной пленки.

В период наблюдений была организована экспериментальная станция локаторного наблюдения за содержанием нефтепродуктов и других неоднородностей в поверхностном слое воды в проливе Бьерке-Зунд (рис. 10).

Стационарный радиолокационный измерительный пост был установлен на береговой площадке научно-исследовательского полигона на дальности около 150 м от уреза воды.

В течение всего срока наблюдений производился круглосуточный радиолокационный контроль зоны ответственности, что обеспечивалось 2—3-сменной

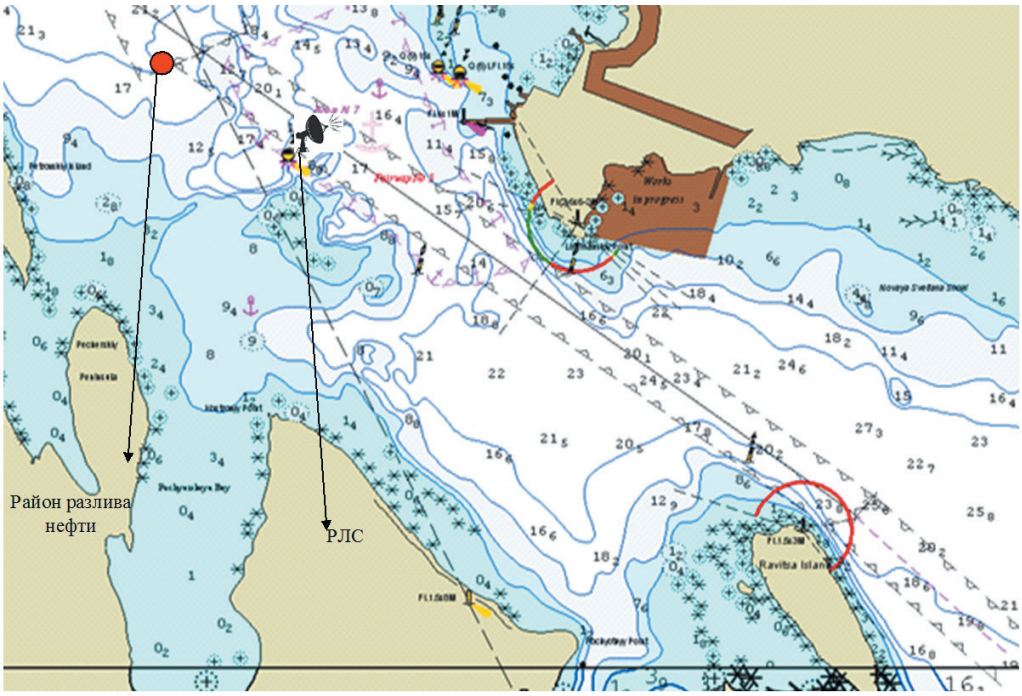

Рис. 10. Схема района проведения эксперимента.

Fig. 10. Scheme of the experiment area.

работой операторов по 8—12 часов в каждой смене соответственно. Наблюдения велись за проходящими в зоне контроля судами и другими источниками возможного несанкционированного сброса нефтепродуктов.

Для осуществления картографирования загрязнений морской поверхности нефтепродуктами производилась регистрация в цифровом виде радиолокационных изображений с интервалом в 10—15 минут.

Во время этой работы и студенты, и преподаватели получили неоценимый опыт в практике проведения как натурных экспериментов, так и теоретических исследований в совершенствовании методов и моделей проведения мониторинга водной поверхности с целью предупреждения экологических катастроф.

Заключение

Результаты, представленные в статье, являются обобщением почти двадцатилетнего опыта исследований коллектива кафедры информационных технологий и систем безопасности в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности.

Из всего разнообразия инструментов реализации дистанционного мониторинга водной поверхности по характеристике оперативности и охвату зоны ответственности предпочтение отдано радиолокационным системам. Радиолокационные

системы являются регистрирующим модулем в составе системы объектового мониторинга, позволяющей получать оперативную информацию об экологической обстановке в случае аварийных ситуаций, возникающих при загрузке и транспортировке нефтепродуктов и других экологически опасных веществ.

Глобальным результатом многолетних исследований является концепция автоматизированной распределенной системы дистанционного экологического мониторинга водной поверхности. Для каждого модуля системы предложены методы, модели обработки пространственных данных, принятия решений на их основе и алгоритмы эффективного размещения датчиков в свободно дрейфующей подсистеме мониторинга. Цель функционирования такой системы заключается в обнаружении разливов нефти на водную поверхность, контроле динамики загрязнений и прогнозировании развития чрезвычайных ситуаций, возникающих в результате экологических катастроф.

Экологическая катастрофа, которая произошла в конце мая 2020 г. в результате аварии на ТЭЦ-3 в Норильске, показывает, что тематика исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности не теряет своей актуальности.

Опыт международного сотрудничества в области защиты окружающей среды показал, что решение экологических задач носит интернациональный характер, а совместные проекты являются эффективным инструментом развития научно-образовательного потенциала высшей школы в области экологии. Участие в международных проектах не только позволяет повысить научно-образовательный потенциал высшей школы, но и оказывает влияние на формирование экологической политики.

Список литературы

1. *Биненко В.И., Донченко В.К., Растоскуев В.В.* Риски и экологическая безопасность природо-хозяйственных систем. СПб: изд-во СПбГУ, 2012. 393 с.
2. *Иванов А.В.* Региональный экологический мониторинг эпохи интернета вещей // Управление техносферой: электрон. журнал. 2018 Т. 1, вып. 2 С. 165—184 URL: http://f-ing.udsu.ru/technosphere. Дата обращения: 13.07.2020.
3. *Monaldo* et al. A Systematic Comparison of QuikSCAT and SAR Ocean Surface Wind Speed // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. V. 42. P. 283—290. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817213
4. *Алёшин И.В., Яковлев В.А.* Современные информационно-оптические технологии оперативного контроля экологического состояния морской среды // Морской Вестник. 2003. № 37. С. 83—87.
5. *Hu Q., Hou Z., Nowinski W.L.* Supervised Range-Constrained Thresholding // IEEE Trans. Image Process. 2005. V. 15, No.1. P. 228—240. DOI: 10.1109/TIP.2005.860348
6. *Гурьева М.Н., Журавель Ю.Н., Тишкин Р.В.* Алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий в районе их интенсивного хозяйственного использования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. № 3. С. 223—232. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232.
7. *Бескид П.П., Шишкин А.Д.* Об опыте проведения экологического мониторинга состояния морской поверхности радиолокационными средствами // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2 (122). С. 20—24.
8. *Чернецова Е.А., Шишкин А.Д.* Обнаружение нефтяного загрязнения водной поверхности по сигналам контактных датчиков // Датчики и системы. 2008. № 9 (112). С. 2—4.
9. История отечественной радиолокации / Под ред. С.В. Хохлова. М.: Издат. дом «Столичная энциклопедия», 2015. 736 с.

10. *Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Слукин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю.* Радиолокационные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 349 с.
11. Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений / Под ред. А.И. Галушкина. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.
12. *Тархов Д.А*. Нейросетевые модели и алгоритмы. Справочник. М.: Радиотехника. 2014. 352 с.
13. *Татарникова Т.М.* Анализ данных. СПб: ГЭУ, 2018. 82 с.
14. *Чернецова Е.А.* Автоматизированная классификация радиолокационных изображений при экологическом мониторинге морской поверхности // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 6. С. 3—6.
15. *Chang H.S., Kang K.* A compressed domain scheme for classifying block edge patterns // IEEE Trans. Image Process. 2005. V. 14. No. 2. P. 145—151. DOI: 10.1109/TIP.2004.840706.
16. *Richards, M.A., Scheer, J.A., Holm, W.A.* Principles of modern radar. Basic principles. Edison, New Jersey: SciTech Publishing, 2010. 924 p.
17. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Оценка количества разлитой нефти на акватории Каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10, № 2. С. 178—188.
18. *Rahnama M., Gloaguen R.* TecLines: A MATLAB-based toolbox for tectonic lineament analysis from satellite images and DEMs. Pt 1. Line segment detection and extraction // Remote Sensing. 2014. V. 6, No. 7. P. 5938—5958. DOI:10.3390/rs6075938
19. *Dziubenko I. N., Tatarnikova T. M.* Algorithm for Solving Optimal Sensor Devices Placement Problem in Areas with Natural Obstacles / 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 1—4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604325
20. *Krishnamurthy V.* POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks / In: Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP). 2005. P. 793—796. DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1416423
21. *Venkatasubramaniam P., Adireddy S., Tong L.* Sensor networks with mobile access: Optimal random access and coding // IEEE J. Sel. Areas Commun. Special Issue on Sensor Networks. 2004. V. 22. P. 1058—1068. DOI: 10.1109/JSAC.2004.830899

References

1. *Binenko V.I., Donchenko V.K., Rastoskuev V.V. Riski i ekologicheskaya bezopasnost' prirodo-khozyaystvennykh system*. Risks and environmental safety of environmental systems. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 2012: 393 p. [In Russian].
2. *Ivanov A.V.* Regional ecological monitoring of the era of the Internet of things. *Upravleniye tekhnosferoy*. Technosphere management. 2018, 1(2): 165-184 URL: http://f-ing.udsu.ru/technosphere. Date of access: 13.07.2020.
3. *Monaldo* et al. A Systematic Comparison of QuikSCAT and SAR Ocean Surface Wind Speed. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004, 42: 283-290. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817213
4. *Aleshin I.V., Yakovlev V.A.* Modern information-optical technologies for the operational control of the ecological state of the marine environment. *Morskoy Vestnik*. Marine Herald. 2003, 37: 83-87. [In Russian].
5. *Hu Q., Hou Z., Nowinski W.L.* Supervised Range-Constrained Thresholding. IEEE Trans. Image Process. 2005, 15(1): 228-240. DOI: 10.1109/TIP.2005.860348
6. *Guryeva M.N., Zhuravel Y.N., Tishkin R.V.* Algorithm of monitoring the ecological state of coastal waters in areas of heavy economic use. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. 15(3):223-232. DOI: 10.182872541-7533-2016-15-3-223-232. [In Russian].
7. *Beskid P.P., Shishkin A.D.* On the experience of environmental monitoring of the state of the sea surface by radar tools. *Bezopasnost' zhiznedeyate*. Life Safety. 2011. 2(122):20-24.
8. *Chernetsova E.A., Shishkin A.D.* Detection of oil pollution of the water surface by the signals of contact sensors. *Datchiki i sistemy*. Sensors and systems. 2008. 9 (112):2-4. [In Russian].
9. *Istoriya otechestvennoy radiolokatsii*. The history of domestic radar/ed. S.V. Khokhlova. Moscow: Capital Encyclopedia Publ. 2015:736 p. [In Russian].

10. *Akhiyarov V.V., Nefedov S.I., Nikolaev A.I., Slukin G.P., Fedorov I.B., Shustikov V.Yu. Radiolokatsionnyye sistemy.* Radar systems. Moscow: MSTU by N.E. Bauman Publ., 2016: 349 p. [In Russian].
11. *Neyrokomp'yutery v sistemakh obrabotki izobrazheniy.* Neurocomputers in image processing systems. Moscow: Radiotekhnika, 2003: 192 p. [In Russian].
12. *Tarkhov D.A. Neyrosetevyye modeli i algoritmy.* Neural network models and algorithms. Directory. Moscow: Radiotekhnika, 2014: 352 p. [In Russian].
13. *Tatarnikova T.M. Analiz dannykh.* Data analysis. St. Petersburg: State Economy University Publ., 2018: 82 p. [In Russian].
14. *Chernetsova E.A.* Automated classification of radar images in environmental monitoring of the sea surface. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii.* Automation and modern technology. 2008, 6: 3-6. [In Russian].
15. *Chang H.S., Kang K.* A compressed domain scheme for classifying block edge patterns. IEEE Trans. Image Process. 2005, 14 (2): 145-151. DOI: 10.1109/TIP.2004.840706.
16. *Richards, M.A., Scheer, J.A., Holm, W.A.* Principles of modern radar. Basic principles. Edison, New Jersey: SciTech Publishing, 2010. 924 p.
17. *Boev A.G., Matveev A.Ya.* Estimation of the amount of spilled oil in the Caspian oil stones "Oil Rocks" according to multi-frequency radar sounding. *Radiofizika i radioastronomiya.* Radiophysics and Radio Astronomy. 2005, 10 (2): 178-188. [In Russian].
18. *Rahnama M., Gloaguen R.* TecLines: A MATLAB-based toolbox for tectonic lineament analysis from satellite images and DEMs. Pt. 1: Line segment detection and extraction. Remote Sensing. 2014, 6 (7): 5938-5958. DOI:10.3390/rs6075938
19. *Dziubenko I. N., Tatarnikova T. M.* Algorithm for Solving Optimal Sensor Devices Placement Problem in Areas with Natural Obstacles. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018: 1-4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604325.
20. *Krishnamurthy V.* POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP). 2005: 793-796. DOI: 10.1109/ICASSP.2005.1416423
21. *Venkatasubramaniam P., Adireddy S., Tong L.* Sensor networks with mobile access: Optimal random access and coding. IEEE J. Sel. Areas Commun. Special Issue on Sensor Networks. 2004, 22: 1058-1068. DOI: 10.1109/JSAC.2004.830899

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует

Статья поступила 15.07.2020
Принята после доработки к публикации 24.08.2020

Сведения об авторах

Бескид Павел Павлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и систем безопасности (2010—2017 гг.) Российского государственного гидрометеорологического университета, mit@rshu.ru

Богданов Павел Юрьевич, старший преподаватель кафедры информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, 45bogdanov@gmail.com

Миклуш Виктория Александровна, старший преподаватель кафедры информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, miklish-v@yandex.ru

Татарникова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, доцент, директор института информационных систем и геотехнологий, Российский государственный гидрометеорологический университет, tm-tatarn@yandex.ru

Чернецова Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, chernetsova@list.ru

Шишкин Анатолий Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, an.dm.shishkin@mail.ru

Information about authors

Beskid Pavel Pavlovich, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor, Head of the Department of Information Technology and Security Systems (2010—2017), Russian State Hydrometeorological University

Bogdanov Pavel Yurievich, Senior Lecturer, Department of Information Technology and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University

Miklush Victoria Alexandrovna, Senior Lecturer, Department of Information Technology and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University

Tatarnikova Tatiana Mikhailovna, Grand PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies, Russian State Hydrometeorological University

Chernetsova Elena Anatolyevna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Chair of Information Technologies and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University

Shishkin Anatoly Dmitrievich, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Chair of Information Technologies and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University