

Разработка радиолокационного комплекса дистанционного обнаружения плёночных загрязнений на поверхности воды

А. В. Ермошкин^{1,2}, И. А. Капустин^{1,2}, Н. А. Богатов^{1,3}, А. А. Моляков^{1,3},
Е. И. Поплавский^{1,3}, Н. С. Русаков^{1,3}, А. Р. Юнисов³

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

² *Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
Нижний Новгород, 603022, Россия

³ *ООО «Радионавигационная компания», Нижний Новгород, 603003, Россия*
E-mail: yunisov_a@radionavcom.ru

В работе представлены первые результаты разработки автоматизированного дистанционного радиолокационного комплекса высокого разрешения для мониторинга акваторий «Экорадар» с целью автоматического обнаружения плёночных загрязнений на взволнованной водной поверхности. В основе комплекса лежит цифровая когерентная радиолокационная станция кругового обзора производства АО «НПФ «Микран», работающая в X-диапазоне на горизонтальной поляризации. Разработан алгоритм автоматического обнаружения плёночных загрязнений на радиолокационных изображениях взволнованной водной поверхности. В основе алгоритма лежат нейроноподобные сети, а большая часть алгоритма реализована с использованием технологии Nvidia CUDA, что позволяет минимизировать время работы. Для апробации алгоритма использовались данные ранее проведённых натурных экспериментов по исследованию кинематики плёночных загрязнений по данным радиолокационных наблюдений в акватории Горьковского вдхр. и прибрежной зоне Чёрного моря. В работе приводятся ограничения и рекомендации применения комплекса «Экорадар» для обнаружения плёночных загрязнений на взволнованной водной поверхности. Дальность обнаружения плёночного загрязнения при высоте установки радиолокатора в 12 м над уровнем воды и благоприятных ветро-волновых условиях достигает 1000 м. Минимальная площадь уверенно обнаруживаемого загрязнения оценивается в 500 м².

Ключевые слова: радиолокация, плёночные загрязнения, автоматизированный комплекс, экологический мониторинг

Одобрена к печати: 28.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-99-108

Введение

В работе развивается хорошо известная идея (Трофимов, 2012) применения радиолокационных станций (РЛС) кругового обзора для обнаружения плёнок поверхностно-активных веществ (ПАВ), к которым относятся нефть и нефтепродукты. Одним из наиболее эффективных методов обнаружения таких загрязнений на морской поверхности выступают методы активной радиолокации в сверхвысокочастотном диапазоне зондирующих радиоволн. Как известно, плёнки ПАВ приводят к гашению мелкомасштабной части ветрового волнения, что проявляется в ослаблении радиолокационного (РЛ) сигнала (Ермаков и др., 1985; Иванова, 2008). На практике чаще работают с понятием РЛ-контраста, характеризующего относительную интенсивность проявления того или иного процесса на фоне чистой воды. Для наблюдений, отличных от надирных, контраст зависит от диапазона длин радиоволн, вещества и толщины плёнки, а также скорости и направления ветра (Кориненко и др., 2017).

Для тонких мономолекулярных плёнок ПАВ вопрос о гашении коротких ветровых волн в настоящее время в существенной степени исследован (Левич, 1940; Cini, Lombardi, 1978; Dorresteijn, 1951; Ermakov et al., 2012). В то же время вопрос о подавлении волнения относительно толстыми плёнками нефтепродуктов остаётся практически открытым. Это связано с тем, что последние характеризуются большим числом параметров: поверхностными и межфазными коэффициентами поверхностного натяжения, вязкостью и упругостью. По этой

причине средства радиолокации активно и успешно применяются для детектирования нефтяных загрязнений, оценки их площади и направления распространения, в то время как для оценки толщины плёнок, а следовательно, и объёмов разлива, привлекаются оптические методы наблюдения в видимом и инфракрасном диапазонах (Мольков и др., 2020).

Сегодня существует ряд коммерческих систем, позволяющих обнаруживать нефтяные загрязнения на морской поверхности. Согласно информации из открытых источников компаний-производителей (Rutter (Канада), Nortek (Нидерланды), Miros, Sea Hawk (Норвегия), Fuguno (Финляндия), Highlander (Китай)), системы схожи структурно, ориентированы на одинаковую приборную базу и протоколы входа, выхода и передачи данных. Вероятно, основная разница заключается в реализации программного обеспечения по мониторингу разливов и оперативному противодействию им. Производители не раскрывают детали физических принципов, алгоритмов обработки и не приводят результаты, количественно подтверждающие эффективность системы (например, процентное отношение ложных обнаружений в зависимости от метеоусловий, вещества поверхностного загрязнителя, размера загрязнения и т.д.). Поэтому произвести адекватную оценку эффективности и надёжности рассмотренных систем мониторинга затруднительно. Перечисленные системы решают задачу обнаружения разливов нефтепродуктов, начиная с существенных объёмов загрязняющего вещества (от 5 л для системы Sigma S6 компании Rutter), что соответствует большой площади плёнки ПАВ на водной поверхности. Такие ограничения могут быть связаны со сравнительно невысоким разрешением применяемых РЛС. Разрабатываемый автоматизированный дистанционный радиолокационный комплекс высокого разрешения для мониторинга акватории, названный «Экорадар», обладает схожими характеристиками, однако, в силу более высокого пространственного разрешения, должен иметь преимущества при работе в условиях внутренних водных путей, где не требуется большая дальность наблюдения, но накладываются высокие требования к разрешающей способности.

Характеристики комплекса

В основе разрабатываемого комплекса «Экорадар» заложено использование твердотельной цифровой РЛС, обеспечивающей высокое разрешение по дальности. Таким требованиям удовлетворяют РЛС производства АО «НПФ «Микран» (Томск) — серия MRS (MRS-1000/1001/1010/1011). РЛС работает в X-диапазоне на горизонтальной поляризации излучения и приёма. Блок-схема комплекса «Экорадар» представлена на *рис. 1*. В месте установки комплекса разворачивается РЛС серии MRS (например, РЛС MRS-1000, параметры которой приведены ниже). Питание РЛС осуществляется через блок питания с напряжением 24 В (БП +24 В), управление РЛС и передача РЛ-данных происходит на персональный компьютер (ПК) через блок сопряжения с подключением по стандарту Ethernet (БС Ethernet). На ПК с программным обеспечением (ПО) «Радар Пост» поступают РЛ-данные с РЛС в непрерывном режиме, которые автоматически обрабатываются в соответствии с алгоритмом, приведённом в разд. «Описание алгоритма». С помощью любого доступного канала связи результаты РЛ-наблюдений поступают удалённым пользователям и отображаются с помощью ПО «Радар Клиент».

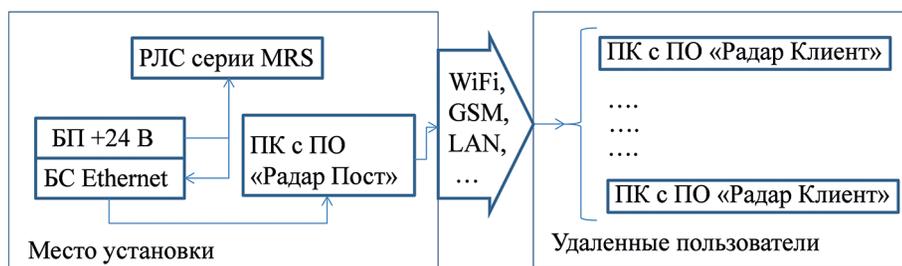


Рис. 1. Блок-схема комплекса «Экорадар»

Параметры РЛС MRS-1000

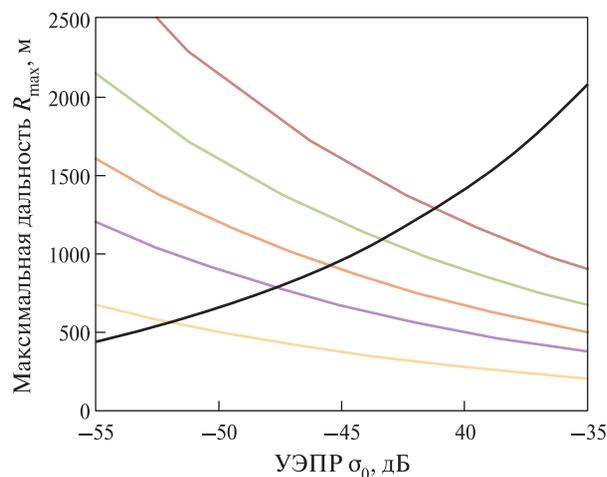
Коэффициент усиления антенны G_t	23 дБ
Полоса пропускания приёмника Δf_r	557 Гц
Коэффициент шума приёмника k_n	4 дБ
Мощность излучения P_t	1 Вт
Рабочая полоса излучаемого сигнала f_0	9300–9500 МГц
Коэффициент различимости k_b	14 дБ
Эффективная площадь антенны A_r	0,4 м ²

Основная характеристика работы комплекса — дальность обнаружения плёночного загрязнения на взволнованной водной поверхности. Известно, что удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) ветрового волнения существенно зависит от угла падения радиоволн (Valenzuela, 1978). При скользких углах зондирования на горизонтальной поляризации излучения УЭПР (σ_0) имеет следующую зависимость от угла зондирования (θ): $\sigma_0 \approx \cos^4 \theta$. Необходимым условием видимости плёночного загрязнения на РЛ-изображениях водной поверхности выступает ненулевой (выше собственного шума РЛС) уровень фонового сигнала. Для оценки максимальной дальности видимости ветрового волнения, а следовательно, и обнаружения плёночного загрязнения можно воспользоваться уравнением дальности радиолокации:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 P_{r.\min}}}, \tag{1}$$

где $P_{r.\min} = kT\Delta f_r k_n k_d$; k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$; T — абсолютная температура приёмника; Δf_r — полоса пропускания приёмника; k_n — коэффициент шума приёмника; k_b — коэффициент различимости (Сколник, 1976).

Рис. 2. Расчёты максимальной дальности обнаружения плёночных загрязнений для параметров РЛС, приведённых выше. Чёрная кривая — максимальная дальность РЛС из уравнения (1); цветные линии — угловая зависимость УЭПР при разных скоростях ветра



Результаты расчётов для параметров РЛС, приведённых выше, представлены на рис. 2. Чёрная линия демонстрирует зависимость максимальной дальности от σ_0 взволнованной водной поверхности. Однако необходимо дополнительно рассмотреть угловую зависимость σ_0 (см. рис. 2). Для высоты установки РЛС, равной 12 м, приведены теоретические угловые зависимости σ_0 для разных значений скорости ветра (цветные линии на рис. 2). Точки пересечения чёрной линии с цветными кривыми — это максимально возможная дальность обнаружения плёночного загрязнения на фоне отражения от ветрового волнения с данными значениями σ_0 . Как видно из рисунка, для данной РЛС, установленной на высоте 12 м, максимальная дальность обнаружения плёночного загрязнения при благоприятных условиях для радиолокационного зондирования (достаточно сильные ветры) не может превышать 1500 м.

Описание алгоритма

В работах (Капустин и др., 2019; Кориненко и др., 2017) и ряде других публикаций исследуется проявление плёночных загрязнений на РЛ-изображениях взволнованной водной поверхности при скользящих углах зондирования. При этом области на РЛ-изображениях, занятые ПАВ, определялись авторами вручную. На основе материалов ранее проведённых исследований (Ермошкин и др., 2020; Капустин и др., 2020) был разработан алгоритм автоматического обнаружения области плёночного загрязнения на временной серии РЛ-изображений, полученной с помощью РЛС кругового обзора.

Работу созданного алгоритма можно представить блок-схемой, приведённой на рис. 3. Задача алгоритма заключается в выделении на РЛ-изображении областей, в которых σ_0 существенно ниже фонового значения, построении контуров найденных областей и расчёте их параметров. Итоговый результат может быть представлен как в относительной системе отсчёта, так и в географических координатах.

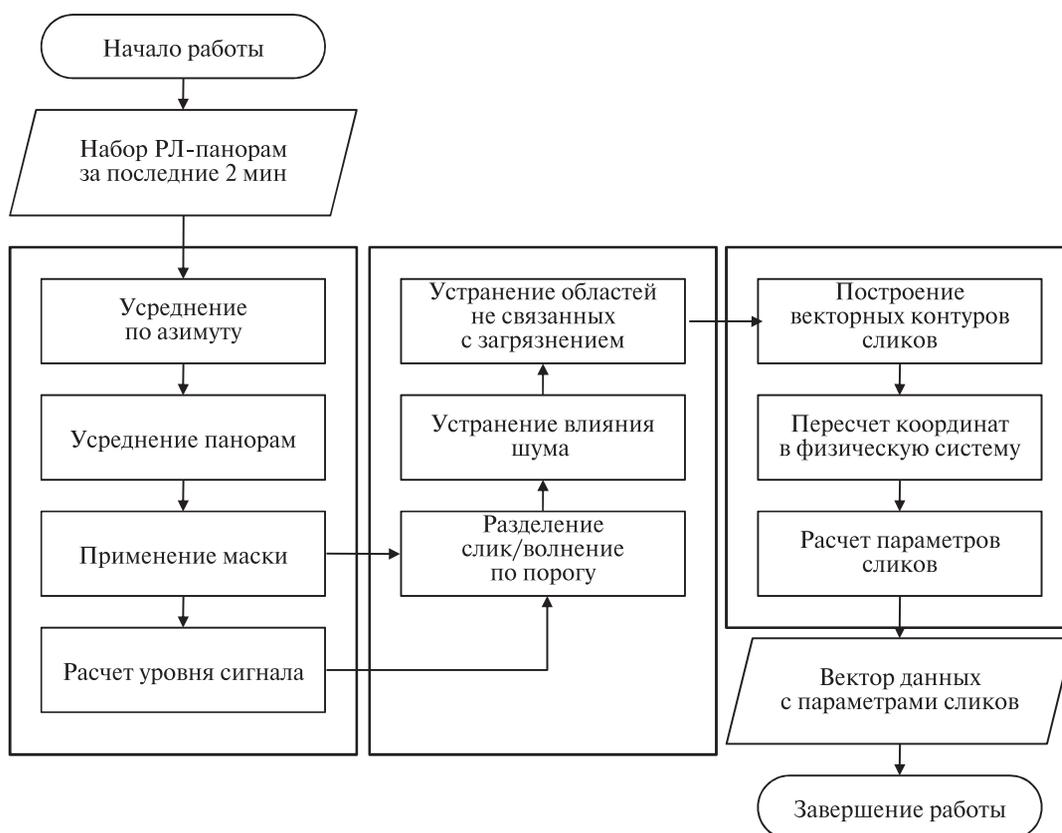


Рис. 3. Общая блок-схема алгоритма автоматического обнаружения области плёночного загрязнения на серии РЛ-изображений водной поверхности и определения его параметров

Сложностью автоматической обработки РЛ-сигнала, отражённого от взволнованной поверхности, является зависимость σ_0 от её состояния: $\sigma_0 \approx f(S(U_w), \theta, \varphi)$, где $S(U_w)$ — параметр волнения, определяемый скоростью ветра; θ — угол зондирования; φ — азимутальный угол между направлением зондирования и направлением волнения. Функциональная зависимость f сложна, а входящие в неё величины не всегда можно вычислить. Таким образом, нельзя однозначно заранее определить уровень сигнала, соответствующий отражению от области волнения и области плёночного загрязнения. Поэтому первоочередной задачей в работе над алгоритмом была разработка метода адаптивного определения среднего уровня $\bar{\sigma}_0$ морской поверхности без влияния внешних факторов (плёночных загрязнений, судов и т. п.).

В качестве входных данных алгоритм использует усреднённое за 2 мин (около 50 РЛ-изображений) РЛ-изображение в координатах «азимут – дальность» $\sigma_0^\Sigma(\varphi, r)$. Далее происходит нормировка матрицы σ_0^Σ на наиболее вероятное значение $\bar{\sigma}_0 = \max\{\text{pdf}(\sigma_0^\Sigma)\}$. После нормировки для определения уровня порога, разграничивающего сигнал, отражённый от области плёночного загрязнения, и сигнал от области волнения, векторы дальности РЛС-сигнала усредняются в заданном угловом секторе для каждого значения азимута. Полученные усреднённые векторы сглаживаются скользящим средним с переменным окном. Размер окна максимальный в близкой зоне и уменьшается с расстоянием. Величину сглаженного сигнала на расстоянии r примем за S_r .

При разработке алгоритма выделения областей сликков на радиолокационных панорамах было отдано предпочтение нейроноподобным сетям по сравнению с регулярными методами. Связано это как с присутствием достаточно сильного шума даже на усреднённых панорамах, так и с необходимостью минимизации времени работы алгоритма. Большая часть алгоритма реализована с использованием технологии Nvidia CUDA (англ. Compute Unified Device Architecture) (<https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>). Вычислительный элемент нейроноподобной сети — нейрон — выполняет следующие действия: вычисление суммы произведения весовых коэффициентов на входной сигнал и сравнение полученного результата с порогом. При превышении порога нейрон считается активным. Математически работу нейрона можно представить в следующем виде:

$$\sum_N w_i X_i \rightarrow \begin{cases} > L = 1, \\ \leq L = 0, \end{cases}$$

где N — количество элементов входного сигнала; w_i — весовые коэффициенты; X_i — входной сигнал; L — порог.

Основная задача разработки и обучения нейроноподобных сетей заключается в нахождении весовых коэффициентов одного или нескольких слоёв нейронов, при которых результат работы алгоритма максимально близок к эталонному. В нашем случае нейроноподобная сеть состоит из пяти слоёв, а работа алгоритма происходит в четыре этапа. Размер каждого из слоёв сети совпадает с размером усреднённого и нормированного РЛ-изображения $\sigma_{0n}^\Sigma(\varphi, r)$.

Первый этап — подготовительный. Слои нейронов, используемый на данном этапе, принимает на вход матрицу $\sigma_{0n}^\Sigma(\varphi, r)$. На вход каждого нейрона поступает один элемент изображения с соответствующими координатами. Величина порога берётся равной $S_r - L_a$, где L_a — постоянный коэффициент. Весовые коэффициенты в данном случае принимают на себя роль корректировки коэффициента L_a . Если взять значение L_a в качестве переменного параметра алгоритма, то весовые коэффициенты можно положить равными единице. На выходе получается бинарная матрица $L_1(\varphi, r)$, в которой нулю соответствуют значения ниже порога, а единице — превышающие порог.

Следующий этап работы алгоритма направлен на уменьшение влияния зашумлённости радиолокационной панорамы, при этом с максимальным сохранением чёткости границ областей сликков. Данный этап состоит из двух слоёв нейронов, близких по смыслу. В качестве входных данных используется полученная на первом этапе бинарная матрица $L_1(\theta, r)$. Будем считать значение элемента бинарной матрицы, равное нулю, принадлежностью к области плёночного загрязнения, а равное единице — к области волнения. Первый слой нейронов призван устранить «ложное» определение области волнения. Второй слой выполняет ту же работу, но только с «ложными» областями плёночных загрязнений. В качестве входного сигнала для одного нейрона берётся некоторая область матрицы заданного радиуса вокруг центрального элемента. Математическое описание нейрона для слоёв данного этапа можно представить в следующем виде:

$$(N+1)X_c + \sum_{i \neq c}^N w_i X_i \rightarrow \begin{cases} > L = 1, \\ \leq L = 0, \end{cases}$$

где N — размер данных входного сигнала для текущего нейрона; X_c — значение центрального элемента; w_i — весовые коэффициенты; L — порог. Если w_i лежат в диапазоне от 0 до N ,

то величину порога для первого слоя берём равную N , а для второго — $2N + 1$. Фактически принцип работы данных слоёв заключается в проверке соответствия центрального элемента входного сигнала X_c своему значению исходя из статистики соседних. После завершения второго этапа имеем бинарную матрицу $L_2(\varphi, r)$, очищенную от характерных шумовых помех.

На третьем этапе алгоритма происходит фильтрация областей, связанных с затенениями гребнями волн РЛ-сигнала и волнения внутри областей плёночных загрязнений по заданным пространственным критериям. Как и в предыдущем случае, на данном этапе используются два слоя нейронов, при этом входной сигнал состоит из значения некоторой центральной точки и точек в кольце, ограниченном двумя радиусами $r_1 > r_2$. Вначале вычищаются области волнения небольших размеров внутри области, занятой плёнкой, затем обработке подвергаются области затенений малых масштабов. В итоге получается бинарная матрица $L_3(\varphi, r)$, в которой значения «0» образуют область плёночных загрязнений, а значения «1» соответствуют области волнения.

На заключительном четвёртом этапе проводится построение контуров областей плёночных загрязнений по итоговой бинарной матрице. В данном случае применяются регулярные методы обработки и отслеживающие алгоритмы. На текущий момент для построения контура используется стандартный «алгоритм обхода контура», или «алгоритм жука», с небольшой коррекцией граничных областей для предотвращения некорректной работы метода. После построения контуров загрязнений рассчитываются их параметры, такие как площадь и координаты центра масс.

Для определения весовых коэффициентов полученной нейроноподобной сети использовался эталонный образец (набор экспериментальных данных), при этом весовые коэффициенты были представлены в виде функций с переменными параметрами, начальные значения которых выбирались случайным образом. После чего происходило движение в пространстве параметров в сторону уменьшения расхождения результата, полученного в ходе работы алгоритма, с эталоном. Движение продолжалось до достижения минимального значения расхождения, а для исключения локального минимума выбирались новые случайные параметры, и процедура повторялась несколько раз. Стоит отметить, что в результате было обнаружено несколько локальных наборов параметров, которые обеспечивали неплохой результат. В итоге был выбран набор параметров, который обеспечивал лучшее соответствие с большим набором экспериментальных данных, полученных при разных метеорологических условиях.

Апробация алгоритма

Проанализированы результаты применения описанного выше алгоритма к архивным радиолокационным изображениям, полученным при различных скоростях и направлениях ветра радиолокаторами серии MRS, а также результаты сравнения автоматического и ручного методов обнаружения загрязнений и определения их параметров. Радиолокационные изображения были получены в ходе нескольких экспериментов, проведённых в течение последних лет авторами статьи (Ермошкин и др., 2020; Капустин и др., 2020). Метеорологические условия экспериментов перекрывают диапазон значений скорости ветра от 1 до 15 м/с. На *рис. 4* приведены результаты такого анализа на примере экспериментальных данных, полученных на Горьковском вдхр. 10 сентября 2020 г. при скорости ветра 7–8 м/с. РЛС устанавливалась на маяке аванпорта с координатами $56^\circ 41' 13''$ с.ш., $43^\circ 23' 44''$ в.д. На усреднённой РЛ-панораме водной поверхности для момента времени 11:30 МСК (московское время) (см. *рис. 4а*) хорошо различимы два слайка в виде параллельных полос, вытянутых вдоль направления ветра. С помощью разработанного алгоритма были обнаружены все искусственные плёночные загрязнения, имитированные спиртовыми растворами олеиновой кислоты и растительным маслом, начиная со скорости ветра 3 м/с. Дальность обнаружения плёночных загрязнений зависела от скорости ветра и при установке РЛС на высоте 12 м составляла от 50 до 1000 м. Вместе с тем имеет место ложное обнаружение, пример которого приведён на *рис. 4б* жёлтыми пятнами малой площади, не совпадающими с контурами плёночных загряз-

нений (красные линии на *рис. 4б*), полученными методом ручного оконтуривания сликков на усреднённой РЛ-панораме (см. *рис. 4а*). Это связано со случайными флуктуациями яркости РЛ-изображения с масштабами, которые могут соответствовать минимальной для обнаружения площади загрязнения. Для устранения ложного срабатывания алгоритма предполагается привлекать физические модели о динамике плёночного загрязнения (см., например, работу (Капустин и др., 2019)), что позволит свести к минимуму ошибки при автоматическом обнаружении.

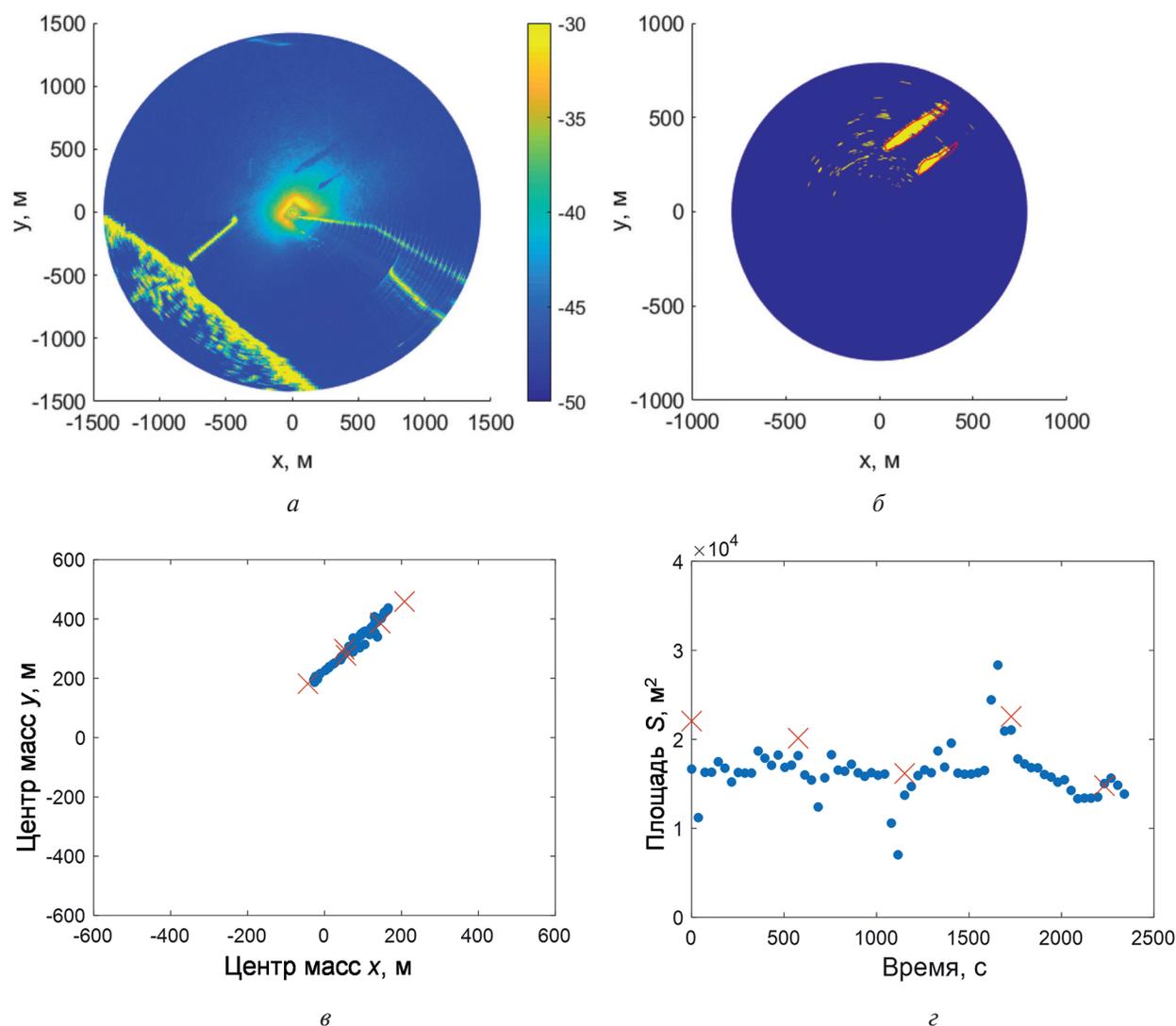


Рис. 4. Пример работы алгоритма автоматического обнаружения области плёночного загрязнения на серии РЛ-изображений водной поверхности и определения его параметров: *а* — усреднённая РЛ-панорама водной поверхности для некоторого момента времени; *б* — результат автоматического обнаружения загрязнения (жёлтые области) и контуры пятен, полученные методом ручного оконтуривания сликков на усреднённой РЛ-панораме (красные линии) для данного момента времени; *в*, *з* — временная динамика координат центра масс и площади для одной области загрязнения (точки — автоматический алгоритм, кресты — метод ручного оконтуривания)

Для рассмотренного примера, когда РЛС устанавливалась на маяке аванпорта Горьковского вдхр., сформулируем ограничения и рекомендации применения комплекса «Экорадар». Комплекс рассчитан на непрерывную круглосуточную работу в автоматическом режиме и может стать первичным обнаружителем плёночного загрязнения на водной поверхности. Дальность обнаружения плёночного загрязнения при благоприятных ветро-волновых условиях достигает 1000 м, что вполне достаточно для наблюдения всей акватории аванпорта

и близлежащей зоны интенсивного судоходства и мест якорной стоянки. Минимальная площадь обнаруживаемого загрязнения оценивается в 500 м^2 . Самый существенный параметр, влияющий на работоспособность комплекса, — ветер. Благоприятные условия для работы комплекса реализуются при скорости ветра более 6 м/с , а в диапазоне скоростей ветра от 2 до 5 м/с дальность обнаружения плёночных загрязнений снижается.

Выводы

В ходе анализа результатов работы был определён ряд особенностей проявления плёночного загрязнения на поверхности внутренних водоёмов в сигналах дистанционной РЛ-аппаратуры в сравнении с морскими условиями. В первую очередь это особенность волнового режима (амплитуда и длина энергонесущей волны). Отсутствие ветровых волн с длиной волны более 10 м , характерных для морских условий, снижает эффект затенения гребнями волн участков морской поверхности при скользящих углах РЛ-зондирования. Это приводит к меньшей площади затенённой водной поверхности и лучшей видимости плёночного загрязнения на РЛ-изображениях. Во-вторых, во внутренних водоёмах наблюдаются слабые скорости течения, которые приводят к меньшей скорости дрейфа пятен загрязнения. Этот факт позволяет увеличить время усреднения РЛ-данных, что увеличивает отношение «сигнал/шум» и способствует лучшему обнаружению плёночного загрязнения. Приведённые особенности проявления плёночного загрязнения на поверхности внутренних водоёмов в сигналах РЛ-аппаратуры позволяют сделать вывод о более благоприятных условиях для его обнаружения в сравнении с морскими условиями. Ветровой режим (наблюдаемые скорости и направления ветра) на внутренних водоёмах сопоставим с морскими условиями и накладывает ограничения на ведение РЛ-мониторинга плёночных загрязнений на водной поверхности. При малых скоростях ветра $2\text{--}5 \text{ м/с}$ на водной поверхности наблюдается большое количество плёнок естественного происхождения, причём дальность видимости РЛ-аппаратуры не превышает $200\text{--}500 \text{ м}$. Диапазон скоростей ветра $6\text{--}12 \text{ м/с}$ наиболее благоприятен для ведения РЛ-наблюдения искусственных (антропогенных) плёночных загрязнений. Дальность видимости РЛ-аппаратуры при этом достигает 1000 м . Естественные (биогенные) плёнки, будучи тонкими (мономолекулярными или близкими к этому), при такой скорости ветра разрушаются в результате ветрового волнения и исчезают с поверхности водоёма. Большие скорости ветра также приводят к разрушению тонких искусственных плёнок, но более толстые остаются видимыми на РЛ-изображениях водной поверхности.

Результаты исследования демонстрируют возможность ведения эффективного экологического мониторинга внутренних водоёмов с помощью автоматизированного дистанционного радиолокационного комплекса высокого разрешения «Экорадар» для мониторинга акваторий.

Работы по созданию комплекса «Экорадар» выполняются в рамках проекта «Разработка автоматизированного дистанционного радиолокационного комплекса высокого разрешения для мониторинга акватории» в целях реализации планов мероприятий Национальной технологической инициативы «Маринет», соглашение № 668ГРНТИС5/63371. Используемые в работе данные и материалы получены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-45-520018 p_a и средств темы госзадания № 0729-2020-0037.

Литература

1. *Ермаков С. А., Панченко А. Р., Талипова Т. Г.* Подавление высокочастотных ветровых волн искусственно созданными поверхностными плёнками // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. С. 76–82.
2. *Ермошкин А. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Даниличева О. А., Поплавский Е. И., Русаков Н. С.* Исследование морфологических особенностей пленочных загрязнений на водной поверхности

- по данным радиолокационных наблюдений // Науч. проблемы водного транспорта. 2020. Т. 64. С. 49–58. DOI: 10.37890/jwt.vi64.96.
3. *Иванова Н. А.* Радиолокационное зондирование поверхностных загрязнений моря из космоса: модельные исследования и некоторые приложения: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2008. 161 с.
 4. *Капустин И. А., Ермошкин А. В., Богатов Н. А., Мольков А. А.* Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 163–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172.
 5. *Капустин И. А., Ермошкин А. В., Мольков А. А.* База данных радиолокационных наблюдений кинематики сликов на морской поверхности: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2020620562. Рег. 25.03.2020.
 6. *Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н.* Радиолокационные контрасты искусственных сликов при скользящих углах зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 185–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-185-194.
 7. *Левич В. Г.* Гашение волн поверхностно-активными веществами. I, II // Журн. экспериментальной и теоретической физики. 1940. Т. 10. № 11. С. 1296–1304; 1941. Т. 11. № 2/3. С. 340–345.
 8. *Мольков А. А., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Ермаков С. А.* Дистанционные методы определения толщины плёнок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27.
 9. *Сколник М. И.* Справочник по радиолокации: пер. с англ. / под общей ред. К. Н. Трофимова. В 4-х т. Т. 1. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
 10. *Трофимов М. С.* Использование импульсных береговых и судовых РЛС миллиметрового диапазона волн для обнаружения разливов нефти: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 110 с.
 11. *Cini R., Lombardini P. P.* Damping effect of monolayers on surface wave motion in liquid // J. Colloid and Interface Science. 1978. V. 65(12). P. 387–389. DOI: 10.1016/0021-9797(78)90170-4.
 12. *Dorrestein R.* General linearized theory of the effect of surface films on water ripples // Proc. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. 1951. V. 54(4). P. 260–272.
 13. *Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Gushchin L. A.* Damping of gravity-capillary waves in the presence of oil slicks according to data from laboratory and numerical experiments // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48. P. 565–572. DOI: 10.1134/S000143381204007X.
 14. *Valenzuela G. R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review // Boundary-Layer Meteorology. 1978. V. 13. P. 61–85. DOI: 10.1007/BF00913863.

Development of a radar complex for oil spill detection

**A. V. Ermoshkin^{1,2}, I. A. Kapustin^{1,2}, N. A. Bogatov^{1,3}, A. A. Molkov^{1,3},
E. I. Poplavsky^{1,3}, N. S. Rusakov^{1,3}, A. R. Yunisov³**

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

² *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603022, Russia*

³ *OOO Radionavigation Company, Nizhny Novgorod 603003, Russia
E-mail: yunisov_a@radionavcom.ru*

The paper presents the first results on the development of an automated high-resolution remote radar system called Ecoradar developed for monitoring water areas for the purpose of automatic detection of film pollution on a wavy water surface. The complex is based on digital coherent panoramic radar manufactured by Micran, operating in the X band on horizontal polarization. An algorithm for automatic detection of film pollution on radar images of a wavy water surface has been developed. The algorithm is based on neuron-like networks, and most of the algorithm is implemented using Nvidia CUDA technology, which minimizes the operating time. To test the algorithm, we used data from previously conducted field experiments to study the kinematics of film pollution based on radar observations in the water area of the Gorky reservoir and the coastal zone of the Black Sea. The paper presents the limitations and recommendations for the use of Ecoradar for the detection of film pollution.

The detection range of film pollution at a radar installation height of 12 m above water level and favorable wind-wave conditions reaches 1000 m. The minimum area of confidently detectable contamination is estimated at 500 m².

Keywords: radar, film pollution, automated complex, environmental monitoring

Accepted: 28.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-99-108

References

1. Ermakov S. A., Panchenko A. R., Talipova T. G., Suppression of high-frequency wind waves by artificially created surface films, *Izvestiya AN USSR. Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, pp. 76–82 (in Russian).
2. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Danilicheva O. A., Poplavsky E. I., Rusakov N. S., Investigation of morphological features of film pollution on water surface by radar sensing data, *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2020, Vol. 64, pp. 49–58 (in Russian), DOI: 10.37890/jwt.vi64.96.
3. Ivanova N. A., *Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnostnykh zagryaznenii morya iz kosmosa: model'nye issledovaniya i nekotorye prilozheniya: Diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Radar sensing of surface pollution of the sea from space: model studies and some applications, Cand. phys. math. sci. thesis), Saint Petersburg, 2008, 161 p. (in Russian).
4. Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Bogatov N. A., Molkov A. A., On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 163–172 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172.
5. Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Molkov A. A., *Baza dannykh radiolokatsionnykh nablyudenii kinematiki slikov na morskoi poverkhnosti* (Database of radar observations of the kinematics of slicks on the sea surface), Certificate of state registration of date base No. 2020620562 (RU), Reg. 25.03.2020 (in Russian).
6. Korinenko A. E., Malinovsky V. V., Kudryavtsev V. N., Radar contrast of artificial slicks at small grazing angles, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 185–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-185-194.
7. Levich V. G., Wave damping by surfactant films, I, II, *J. Experimental and Theoretical Physics*, 1940, Vol. 10, No. 11, pp. 1296–1304, 1941, Vol. 11, No. 2/3, pp. 340–345 (in Russian).
8. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Ermakov S. A., Remote sensing methods for measuring the thickness of oil/oil product films on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27.
9. Skolnik M. I., *Radar handbook*, New York: McGraw-Hill, 1970, 1536 p.
10. Trofimov M. S., *Ispol'zovanie impul'snykh beregovykh i sudovykh RLS millimetrovogo diapazona voln dlya obnaruzheniya razlivov nefii: Diss. kand. tekhn. nauk* (The use of pulsed coastal and ship radars of the millimeter wave range for detecting oil spills, Cand. techn. sci. thesis), Saint Petersburg, 2012, 110 p. (in Russian).
11. Cini R., Lombardini P. P., Damping effect of monolayers on surface wave motion in liquid, *J. Colloid and Interface Science*, 1978, Vol. 65(12), pp. 387–389, DOI: 10.1016/0021-9797(78)90170-4.
12. Dorrestein R., General linearized theory of the effect of surface films on water ripples, *Proc. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1951, Vol. 54(4), pp. 260–272.
13. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Gushchin L. A., Damping of gravity-capillary waves in the presence of oil slicks according to data from laboratory and numerical experiments, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, pp. 565–572, DOI: 10.1134/S000143381204007X.
14. Valenzuela G. R., Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 61–85, DOI: 10.1007/BF00913863.