

УДК 556.06

МАКЕТ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АКВАТОРИИ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А.В. Ермошкин

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

И.А. Капустин

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

А.А. Мольков

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

Е.И. Поплавский

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

Н.С. Русаков

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос создания системы экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища. Предложено совмещение известного модельного подхода для расчетов траекторий дрейфа пассивных частиц на морской поверхности с данными дистанционного радиолокационного зондирования в сверхвысокочастотном диапазоне, которые обеспечивают первичное обнаружение разлива загрязняющих веществ на рассматриваемой акватории. В качестве дистанционной составляющей системы выступала цифровая когерентная радиолокационная станция X-диапазона. Модельная составляющая системы опирается на результаты ранее проведенных работ в части измерения скоростей течений в исследуемой акватории и физического описания дрейфа пленочного загрязнения. В результате проведенных комплексных натурных исследований продемонстрирована работоспособность разработанной системы для обнаружения и прогноза дальнейшего распространения пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища.

Ключевые слова: пленочные загрязнения, поверхностно-активные вещества, радиолокация, дистанционное зондирование, моделирование, мониторинг

Введение

Задача экологического мониторинга внутренних водных путей в последние годы становится весьма актуальной, что связано с обращением особого внимания на проблемы антропогенного загрязнения и на программы оздоровления рек России [1]. Одним из наиболее распространенных типов загрязнения можно назвать разливы нефтепродуктов при сбросе с судов, при их перегрузке и транспортировании на внутренних водных путях [2]. При попадании нефтепродуктов в водную среду на поверхности воды образуется пленка данного вещества. Исследование процессов распространения пленочных загрязнений на поверхности водоемов представляет интерес для обеспечения экологической безопасности районов интенсивного судоходства, в первую очередь – прибрежных акваторий морей и внутренних водных путей [3, 4, 5]. Диагностика загрязнения на ранних стадиях и его оперативный мониторинг позволяют существенно сократить затраты на ликвидацию последствий разлива и уменьшить экологические риски [6, 7]. Определение состава и толщины пленки загрязняющего вещества преимущественно осуществляется с помощью контактных методов, однако обнаружение факта загрязнения, оценка площади разлива вещества и параметров его движения возможны и с помощью методов дистанционного зондирования [8]. Преимуществами среди других дистанционных приборов для решения данной задачи обладает радиолокатор кругового обзора, работающий в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Благодаря высокому пространственному и временному разрешению радиолокационных панорам водной поверхности удастся диагностировать пленочное загрязнение на ранних стадиях и отследить его эволюцию [9]. Детектирование загрязняющих пленок с помощью навигационных радиолокационных станций (РЛС) в последнее время занимает важное место в экологическом мониторинге деятельности нефтедобывающих морских платформ. Такие известные коммерческие системы, как MIROS, sigmaS6, SedarQ успешно выполняют задачу обнаружения нефтяных загрязнений в морских условиях [10, 11, 12]. Известно, что нефтесодержащие пленки становятся видимыми на радиолокационных изображениях морской поверхности, получаемых в СВЧ-диапазоне благодаря гашению ими определенного участка спектра ветровых волн.

Существуют модели, позволяющие оценивать радиолокационные контрасты для различных веществ [13, 14].

Исследование динамики пленок ПАВ представляет большой интерес, связанный с необходимостью обнаружения загрязнений на морской поверхности (например, нефтяных разливов), прогнозированием вероятных сценариев дальнейшего развития аварийной ситуации и необходимостью идентификации вещества загрязнителя. Однако область уверенного обнаружения пленочного загрязнения с помощью СВЧ-радиолокаторов невысока и для самых благоприятных условий ограничена дальностью в 1 км, что является приемлемым для рек, но для акваторий водохранилищ недостаточна. В то же время известно, что разливы нефтепродуктов чаще всего происходят в районах бункеровки или длительной стоянки судов, которые могут быть освещены с помощью такого радиолокатора и при появлении загрязнения на водной поверхности оно будет обнаружено. Дальнейшая динамика пленочного загрязнения может быть рассчитана на основе численного моделирования. Для построения прогностических моделей дрейфа пленочного загрязнения могут привлекаться различные физические модели, учитывающие совместное влияние приводного слоя атмосферы и водной толщи. К известным программным продуктам, проводящим расчет дрейфа пленочного загрязнения на морской поверхности можно отнести GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) [15], STW (SeatrackWeb) [16] и другие. Общей особенностью всех моделей является необходимость привлечения дополнительной информации об интересующей акватории, основной из которой является скорость течения. Внутренние водоемы и прибрежные зоны морей обладают рядом особенностей, отличающих данные акватории от открытого океана. В первую очередь, это ограниченные разгоны ветрового волнения и небольшая глубина. В работе [17] на основе натурных данных была проведена оценка вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения. Было показано, что скорость и направление дрейфа центра масс пленочного загрязнения хорошо описываются векторной суммой скорости течения водной толщи и 3% скорости приводного ветра, в том числе, в условиях ограниченных разгонов волнения [18]. В настоящей работе с использованием результатов [17] проведено численное моделирование распространения пленочных загрязнений в акваториях внутренних водоемов при наличии информации о скорости течения.

1. Радиолокационная составляющая

Как следует из введения, для экологического мониторинга протяженной акватории, к которой относится Горьковское водохранилище, необходимо привлечение инструментальной и модельной составляющих. Наиболее эффективным всепогодным средством дистанционного обнаружения пленочного загрязнения на поверхности водоема является радиолокатор СВЧ диапазона. В данной системе экологического мониторинга использовалась цифровая когерентная РЛС MRS-1000, работающая в X-диапазоне длин радиоволн производства НПО «Микран» г. Томск. Параметры радиолокатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры радиолокатора

Характеристика	MRS-1000
Мощность излучения	1 Вт
Несущая частота (длина волны)	9,4 ГГц (3,2 см)
Дальность	до 3000 м
Ширина ДНА в ГП/ ВП	1° / 30°
Режим работы	ЛЧМ($f_m=191,2$ МГц)
Поляризация	Горизонтальная
Период повторения	3,5 мс
Разрешение по пеленгу	0,5°
Разрешение по дальности	0,79 м
Период обзора пространства	2,5 с – 16 с

РЛС устанавливалась на крыше маяка на конце мола аванпорта Горьковского водохранилища (рис. 1). Такое место установки является наиболее удачным и позволяет проводить обзор обширной акватории, по которой проходит внутренний водный путь и находится место якорной стоянки судов, ожидающих проход шлюзов. Дополнительно на крыше устанавливалась метеостанция для измерения скорости и направления ветра.



Рис. 1. Место установки радиолокатора на Горьковском водохранилище

Пример радиолокационной панорамы водной поверхности, на которой присутствует пленочное загрязнение, приведен на рис. 2. На изображении хорошо различимы молы аванпорта и береговая линия. Область, занятая пленочным загрязнением на изображении выглядит как локальное понижение уровня сигнала с резкими границами. На временной серии радиолокационных панорам область загрязнения смещается, что может являться еще одним признаком для его автоматического распознавания.

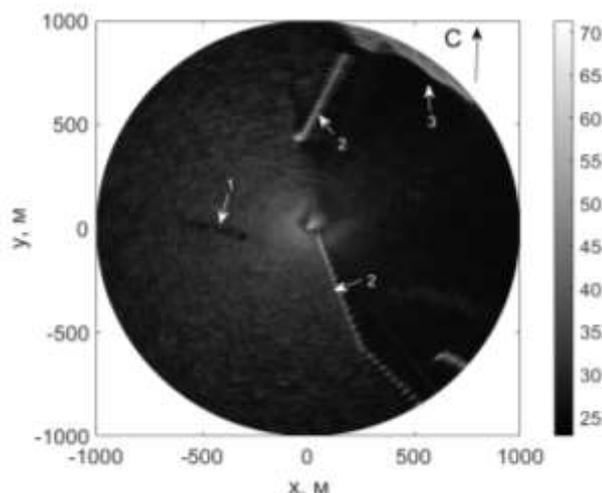


Рис. 2. Радиолокационная панорама с пленочным загрязнением на Горьковском водохранилище: 1 – пленочное загрязнение, 2 – молы аванпорта, 3 – берег, радиолокатор установлен в центре координат.

2. Модельная составляющая

В работе [19] приведены результаты многолетних измерений глубины озерной части Горьковского водохранилища, а также результаты измерений структуры течений при различных среднесуточных расходах через Нижегородскую ГЭС. На основе этих данных была разработана программа для моделирования дрейфа пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища в среде Matlab. В программе задается расчетная сетка (x, y) , границы акватории (Xb, Yb) , начальные координаты точки разлива $(X0, Y0)$, компоненты скорости ветра (uw, vw) , интерполированные на равномерную сетку компоненты скорости течения $(uc(x,y), vc(x,y))$ из работы [19] и структура глубины водохранилища $h(x,y)$. Решение системы уравнений (1) на расчетной сетке производится методом Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = u_c(x, y) + 0,03 \cdot u_w(x, y) \\ \frac{\partial y}{\partial t} = v_c(x, y) + 0,03 \cdot v_w(x, y) \end{cases} \quad 1)$$

В результате моделирования выводятся координаты центра тяжести пленочного загрязнения в заданный момент времени на картографической основе Горьковского водохранилища. На рис. 3 приведены примеры моделирования распространения пленочного загрязнения, на которых представлены траектории движения центра масс пятна загрязнителя до достижения им береговой линии. Для случая южного ветра 5 м/с (рис. 3

слева) рассчитаны траектории дрейфа загрязнения из трех точек: на плотине, западнее и в районе г. Пучеж. Видно отклонение траекторий движения от линейной под действием течения водной толщи. На рис. 3 справа представлены результаты моделирования, при котором загрязнение проходит через всю акваторию Горьковского водохранилища, что реализуется при северо-северо-западном ветре 5 м/с. Стоит отметить, что существует возможность задания переменного во времени ветра, что существенным образом повлияет на траекторию распространения загрязнения. С помощью операции обращения времени в модели можно также вычислить местоположение предполагаемого источника загрязнения.

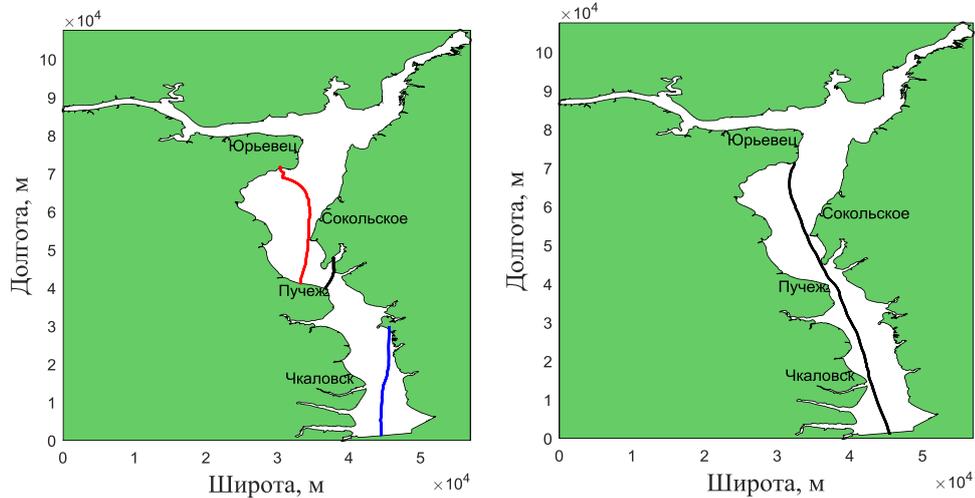


Рис. 3. Моделирование траектории центра масс пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища (слева) для случая южного ветра 5 м/с, (справа) для случая северо-северо-западного ветра 5 м/с.

3. Результаты работы системы

Проверка результатов работы системы опирается на анализ материалов комплексных натуральных исследований растекания пленочных загрязнений. Эксперименты проводились на Горьковском водохранилище в 2018 и 2019 годах с использованием цифровой когерентной РЛС MRS-1000. Метеорологическая обстановка фиксировалась при помощи метеостанции VantagePro 2 Davis Instruments, скорость и направления течения в приповерхностном слое восстанавливалась по данным акустического доплеровского профилографа ADCP WorkHorse Sentinel 600 kHz. Разлив поверхностно-активного вещества, которым являлся спиртовой раствор олеиновой кислоты (OLE) или растительное масло (OIL), осуществлялся на расстоянии до 1 км от места установки РЛС с плавучей лаборатории ИПФ РАН «Геофизик». В ходе экспериментов были одновременно получены энергетические и скоростные характеристики рассеяния СВЧ радиоволн водной поверхностью в присутствии пленки ПАВ в X-диапазоне, и проведены синхронные измерения двумерного спектра волнения, скорости и направления течения, скорости и направления приводного ветра, температуры воды и воздуха.

Примеры динамики пленочных slicks при разных скоростях и направлениях ветра для двух экспериментов приведены на рис. 4. Контуры пятна ПАВ были определены по данным радиолокационной съемки водной поверхности.

В результате анализа экспериментальных данных было показано, что растекание пятна ПАВ происходит несимметрично, формируется вытягивание пятна вдоль направления ветра, кроме того, динамика движения slicka определяется совокупностью влияния приповерхностного течения и ветрового дрейфа, составляющей порядка 3% от величины скорости ветра. Полученный результат находится в хорошем согласии с ранее проведенными исследованиями [17]. На рис. 5 представлен результат сопоставления траектории дрейфа пленочного загрязнения зафиксированной с помощью радиолокатора (красные символы) с рассчитанной с помощью модельной составляющей системы (черные символы). В качестве начальных данных в модели выступали первоначальное местоположение пятна и измеренная скорость ветра и течения, сумма вектора течения и 3% скорости ветра приведена синими стрелками на рис. 4 и на рис. 5. Наблюдается хорошее воспроизведение положения центра масс пленочного загрязнения моделью.

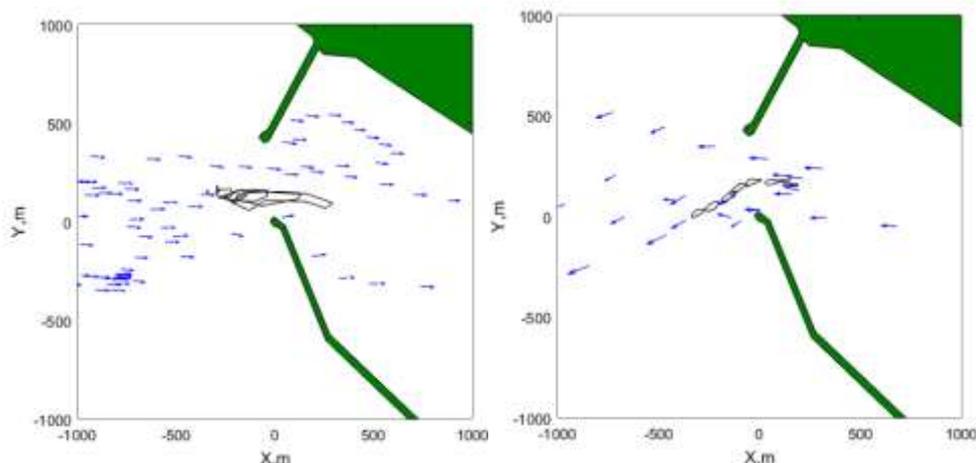


Рис. 4. Динамика слика в акватории Горьковского водохранилища в экспериментах 29.05.2018 (слева) и 23.07.2018 (справа). Стрелками показана сумма вектора течения и 3% скорости ветра, положение слика OIL (слева) и OLE (справа) в разные моменты времени показаны черными контурами

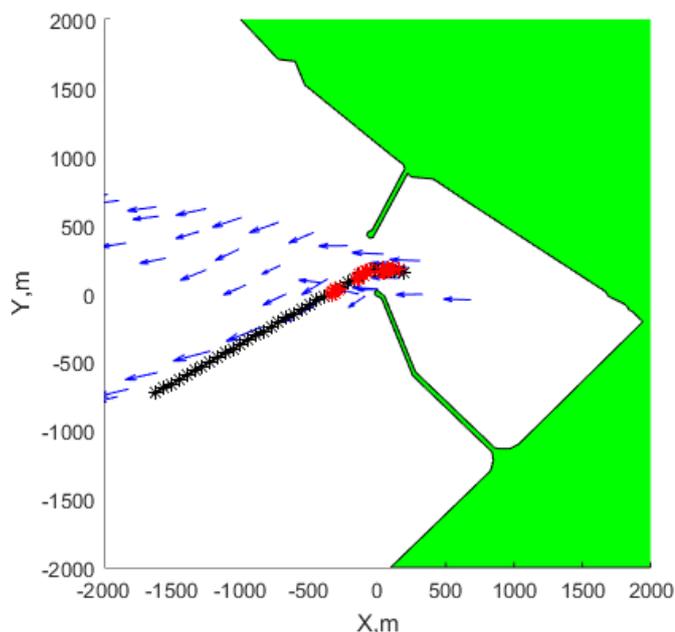


Рис. 5. Результаты сопоставления моделирования траектории центра масс пленочного загрязнения в акватории Горьковского водохранилища (черные символы) с наблюдаемым в эксперименте дрейфом модельного загрязняющего пятна (красные символы)

Заключение

В настоящей статье представлена разработанная система для экологического мониторинга пленочных загрязнений в акватории Горьковского водохранилища для определения последствий разлива и минимизации возможного ущерба. Система включает в себя радиолокационную и модельную компоненты, которые дополняют друг друга. Обнаружение факта загрязнения осуществляется с помощью радиолокатора, устанавливаемого для обзора наиболее опасных с точки зрения загрязнений областей акватории. Местоположение загрязнения и скорость ветра в момент обнаружения являются начальными данными для расчета его траектории при дальнейшем распространении с помощью модельной составляющей системы. Следует отметить, что с помощью предложенной модели можно проводить расчеты разных сценариев развития событий в зависимости от задаваемой скорости и направления ветра.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-520018 p_a и РГО (проект № 02/2019-Р).

Список литературы:

1. Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. Москва: Студия Ф1, 2019. – 572 с.
2. Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игонина М.В. Моделирование процесса растекания нефти при выполнении судами в счалах погрузо-разгрузочных операций (ПРО). Речной транспорт (XXI век). 2015. – № 5 (76) – с. 42–47.
3. Журбас В.М. Основные особенности распространения нефти в море. Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, М.: ВИНТИ. 1978. т. 12. с. 144–159
4. Коротаев Г.К., Кровотынцев В.А.. Интегральная модель динамики нефтяного разлива.
5. Мониин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат. 1985. 376 с.
6. Этин В.Л., Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Васькин С.В., Лукина Е.А., Сосенков Ф.С. Организация борьбы с разливами нефти на внутренних водных путях. монография /– Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – 284 с.
7. Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Кузьмичев А.И. Техничко-экономическая оценка реализации положения о функциональной подсистеме организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти на внутренних водных путях России. В сборнике: Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. Труды международного научно-промышленного форума. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов. ВГБОУ ВО ННГАСУ, ФГБОУ ВО «ВГУВТ». 2017. С. 17.
8. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // Sensors. 2018. Vol. 18. №. 1. P. 91.
9. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН. 2010. 164 с.
10. Measuring the Ocean Surface, Available at: <https://www.miros-group.com>
11. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System, Available at: <http://rutter.ca/sigma-s6>
12. The SeaDarQ radar system, Available at: <http://www.seadarq.com>
13. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гушин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 86–98.
14. Дудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гушин Л.А., Ермаков С.А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в снимках, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт №. 765. ИПФРАН, Нижний Новгород, 2008. 34 с.
15. General NOAA Operational Modeling Environment, Available at: <https://gnome.org.noaa.gov/>
16. SeatrackWeb, Available at: <http://www.helcom.fi/action-areas/response-to-spills/helcom-seatrackweb-and-oil-drift-modeling/>
17. 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.
18. Wu J. Wind-induced drift currents // J. FluidMech. 1975. Vol. 68. Issue 1. P. 49–70.
19. Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища. Метеорология и Гидрология. 2019. №7. С. 110–117.

MODEL OF SYSTEM OF ECOLOGICAL MONITORING OF FILM POLLUTIONS IN THE GORKOVSKY RESERVOIR

Alexey V. Ermoshkin

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Ivan A. Kapustin

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Alexandr A. Molkov

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Evgeny I. Poplavsky

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Nikita S. Rusakov

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the issue of creating a system of environmental monitoring of film pollutions in the Gorky reservoir. A combination of the well-known model approach for calculating the drift trajectories of passive particles on the sea surface with the data of remote sensing, which provide primary detection of a spill of pollutants in the scanned area, is proposed. X-band digital coherent radar was the source of remote data. The model component of the system is based on the results of measurements of current velocities and the physical dependence of the slick drift. As a result of comprehensive studies, the developed system has demonstrated operability for detecting and predicting the spread of film pollution in the Gorky reservoir.

Keywords: film slick, surfactants, radar, remote sensing, modeling, monitoring

References:

1. Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiyskikh rek i puti ikh resheniya. Sbornik nauchnykh trudov. Moscow: Studiya F1, 2019. – 572 p.
2. Cheban E.Yu., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. Modelirovanie protsesssa rastekaniya nefiti pri vypolnenii sudami v schalakh pogrugo-razgruzochnykh operatsiy (PRO). Rechnoy transport .2015. – № 5 (76) – p. 42–47.
3. Zhurbas V. M. Osnovnye osobennosti rasprostraneniya nefiti v more. Itogi nauki i tekhniki. Mekhanika zhidkosti i gaza, M.: VINITI.1978. Vol. 12. p. 144–159

4. G.K. Korotaev, V.A. Krovotyntsev. Integral'naya model' dinamiki neflyanogo razliva.
5. Monin A.S., Krasitskiy V.P. Yavleniya na poverkhnosti okeana. L.: Gidrometeoizdat. 1985. 376 p.
6. Etnin V.L., Cheban E.Yu., Ivanov V.M., Vas'kin S.V., Lukina E.A., Sosonkov F.S. Organizatsiya bor'by s razlivami nefli na vnutrennikh vodnykh putyakh. Monografiya N. Novgorod: Izd-vo FGBOUVO «VGUVT», 2015. – 284 p.
7. Cheban E.Yu., Ivanov V.M., Kuz'michev A.I. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka realizatsii polozheniya o funktsional'noy podsysteme organizatsii rabot po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefli na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossii. V sbornike: Problemy ispol'zovaniya innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek. Trudy mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov. V GBOU VO NNGASU, FGBOU VO «VGUVT». 2017. p. 17.
8. Fingas M., Brown C.E. A review of oil spill remote sensing // Sensors. 2018. Vol. 18. № 1. P. 91.
9. Ermakov S.A. Vliyaniye plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln. N. Novgorod: IPF RAN. 2010. 164 p.
10. Measuring the Ocean Surface. <https://www.miros-group.com>
11. Sigma S6 Oil Spill Detection (OSD) System. <http://rutter.ca/sigma-s6>
12. The SeaDarQ radar system. <http://www.seadarq.com>
13. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Gushchin L.A. Plenki na morskoy poverkhnosti i ikh distantsionnoye zondirovaniye. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. Vyp. 3. Vol. 2. P. 86–98.
14. Kudryavtsev V.N., Ivanova N.A., Gushchin L.A., Ermakov S.A. Otsenka kontrastov spektra vetrovykh voln v slikakh, vyzvannykh biogennymi i neflyanymi plenkami: Preprint № 765. IPFRAN, Nizhniy Novgorod, 2008. 34 p.
15. General NOAA Operational Modeling Environment. <https://gnome.orr.noaa.gov/>
16. SeatrackWeb. <http://www.helcom.fi/action-areas/response-to-spills/helcom-seatrackweb-and-oil-drift-modeling/>
17. Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Mol'kov A.A. Ob otsenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoy poverkhnosti v usloviyakh ogranichennykh razgonov volneniya. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. Vol. 16. № 2. P. 163–172.
18. Wu J. Wind-induced drift currents // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 68. Issue 1. P. 49–70.
19. Kapustin I.A., Mol'kov A.A. Struktura techeniy i glubiny v ozernoy chasti Gor'kovskogo vodokhranilishcha. Meteorologiya i Gidrologiya. 2019. № 7. P. 110–117.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Валерьевич Ермошкин, к.ф.-м. научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

Иван Алесандрович Капустин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

Александр Андреевич Мольков, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: wave3d@mail.ru

Евгений Иванович Поплавский, лаборант-исследователь, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: keeppcalmandhavefun@mail.ru

Никита Сергеевич Русаков, лаборант-исследователь, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: nikitarusakov228@yandex.ru

Alexey V. Ermoshkin, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

Ivan A. Kapustin, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, senior researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: kapustin-i@yandex.ru

Alexandr A. Molkov, Ph.D. in Physico-mathematical sciences, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: wave3d@mail.ru

Evgeny I. Poplavsky, Laboratory Assistant Researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, e-mail: keeppcalmandhavefun@mail.ru

Nikita S. Rusakov, Laboratory Assistant Researcher, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46 Ul'yanov st., Nizhniy Novgorod, 603950, Russia, nikitarusakov228@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2019 г.