Методика оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам по данным дистанционного зондирования Земли

О. В. Григорьева, Д. В. Жуков, А. В. Марков, В. Ф. Мочалов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, 197198, Россия
E-mail: alenka12003@mail.ru

В статье рассматривается методика обработки данных гиперспектральной аэрокосмической съёмки с точки зрения оценки вреда, причинённого водным объектам загрязнениями нефтепродуктами и минеральными взвесями. Реализованные в методике алгоритмы позволяют в автоматическом режиме на основе анализа отличительных спектральных признаков вредных веществ определять их количественные показатели, которые учитываются в нормативно-методических документах, устанавливающих порядок исчисления эколого-экономического ущерба. Исходные данные, использовавшиеся для исследования спектральных характеристик типовых загрязнений акваторий и верификации предложенных алгоритмов, были получены в ходе специально организованных аэросъёмочных работ на Баренцевом и Чёрном морях, а также в результате обработки данных космической гиперспектральной съёмки. Представленные материалы являются развитием ранее проведённого авторами цикла исследований, в результате которого была сформирована система спектральных признаков для обнаружения и определения интенсивности негативного воздействия на водоёмы. В дополнение к ранее разработанным алгоритмам предложены оригинальные способы оценивания показателей, необходимых для расчёта массы вредных веществ: глубины распространения минеральных взвесей и цветности нефтяных плёнок. Для оценивания глубины применяются многопараметрические методы оптимизации (включая нейросетевые технологии), основанные на преимуществе многомерности гиперспектральных данных и использовании модели переноса светового потока в водной среде, учитывающей процессы рассеивания и поглощения излучения растворенным «жёлтым» веществом, органическими и неорганическими взвесями. Классификация разливов нефтепродуктов по цветности осуществляется по установленным в результате проведённых экспериментов спектральным признакам нефтяных плёнок в узких полосах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. В совокупности предложенные алгоритмы позволяют при обработке гиперспектральных изображений определить полный набор исходных данных, необходимых в соответствии с нормативными документами для исчисления размера вреда, нанесённого водному объекту.

Ключевые слова: гиперспектральная аэрокосмическая съёмка, оценка вреда, загрязнения нефтепродуктами и минеральными взвесями, информативные спектральные признаки

Одобрена к печати: 20.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-233-244

Введение

В настоящее время в интересах экологического мониторинга морей и внутренних водоёмов всё более активно используются авиационные и космические средства наблюдения, позволяющие оперативно проводить обследования обширных акваторий. При этом современная съёмочная аппаратура (телевизионная (Радиотехнические..., 2000), тепловизионная (Мельников и др., 2012), радиолокационная (Лаврова и др., 2011)) обеспечивает получение изображений, при обработке которых возможно решение задач обнаружения и классификации типовых вредных веществ в автоматическом или автоматизированном режиме.

Вместе с тем практическое применение материалов аэрокосмической съёмки существенно ограничивается тем обстоятельством, что информации только о местоположении и типе загрязнения, как правило, недостаточно заинтересованным потребителям (подразделениям Росприроднадзора, Росводресурсов и др.) для оценивания степени опасности выявленного негативного воздействия и размера ущерба, нанесённого водному объекту. Для определения

этих показателей в соответствии с действующими нормативно-методическими документами необходимо знание массы *M* загрязняющего вещества — характеристики, которая по данным дистанционного зондирования непосредственно не измеряется.

Порядок расчёта эколого-экономического ущерба водоёмам установлен в «Методике исчисления размера вреда, причинённого водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» (далее — Методике), утверждённой Приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 г. № 87 (Об утверждении..., 2009). В данном документе для вычисления массы наиболее распространённых антропогенных загрязнений акваторий — нефтепродуктами (НП) и минеральными взвешенными веществами (ВВ) — используются следующие формулы:

$$М_{НП} = УМ_{НП} \times S_{НП} \times 10^{-6},$$

$$М_{ВВ} = S_{ВВ} \times h_{СР} \times (C_{ВВ} - C_{Ф}) \times 10^{-6},$$

где $УМ_{НП}$ — удельная масса нефтепродуктов на 1 м^2 акватории водного объекта, г/м^2; $S_{НП}$, $S_{ВВ}$ — площади акватории водного объекта, загрязнённые соответственно нефтепродуктами и взвешенными веществами, м^2; $h_{СР}$ — средняя глубина распространения загрязняющих ВВ в акватории водного объекта, м; $C_{ВВ}$ — средняя концентрация загрязняющих ВВ, мг/дм^3; $C_{Ф}$ — фоновая концентрация ВВ, установленная для данного водного объекта, мг/дм^3; 10^{-6} — коэффициент перевода массы загрязняющих веществ в тонны.

При этом в Методике для определения удельной массы НП рекомендуется использовать метод визуального анализа формы и цветности нефтяных плёнок (*таблица*), а для оценки концентрации и глубины распространения ВВ — результаты инструментальных замеров, например полученных посредством судовых измерений.

Обобщение требований Методики позволяет сделать вывод, что для расчёта вреда водным объектам от загрязнений НП и минеральными ВВ в качестве исходных данных необходимо иметь информацию о следующих показателях: площадь загрязнений, удельная масса или цветность нефтяных плёнок, концентрация и глубина распространения взвеси в воде.

Удельная масса нефтепродуктов на 1 м^2 акватории водного объекта при различном внешнем виде плёнки (по данным Методики)

Класс плёнки	Внешние признаки плёнки нефти, нефтепродуктов	$УМ_{НП}$, г/м^2
0	Чистая поверхность акватории без признаков цветности при различных условиях освещённости	0
1	Отсутствие плёнки и пятен, отдельные радужные полосы	0,1
2	Отдельные пятна и серые плёнки серебристого налёта на поверхности воды, появление первых признаков цветности	0,2
3	Пятна и плёнки с яркими цветными полосами	0,4
4	Пятна и плёнки, покрывающие значительные участки акватории, с переходом цветности к тусклой мутно-коричневой	1,2
5	Сплошной слой нефтепродуктов, цветность тёмная, темно-коричневая	2,4

Традиционно используемые средства экологического мониторинга в автоматическом режиме обеспечивают только идентификацию вредных веществ и определение границ их распространения в акватории (Виноградов и др., 2017; Копелевич и др., 2008; Лаврова и др., 2014; Митягина и др., 2015; Novoa et al., 2017; Stumpf, Holderied, 2003). Для определения толщины плёнок НП применяются методы лазерной локации (Белов и др., 2010), которые в настоящее время могут быть реализованы только на авиационных носителях.

Авторами статьи для решения задачи контроля загрязнённости водных объектов предлагается использовать данные гиперспектральной (ГС) аэрокосмической съёмки, при обработке которых возможно автоматическое распознавание вредных веществ на основе знания отличительных особенностей их спектральных характеристик. Проведённые ранее теоретические и экспериментальные исследования (Григорьева, Шилин, 2012; Григорьева и др., 2017; Жуков, 2014, 2016) позволили установить спектральные признаки для оценивания площади

распространения и интенсивности (толщины плёнок НП, концентрации ВВ) типовых загрязнений. В настоящей статье представлены результаты дополнительных изысканий, которые были направлены на разработку алгоритмов определения всех остальных показателей, необходимых для расчёта $M_{НП}$ и $M_{ВВ}$, и на завершение тем самым формирования методики оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам по ГС-данным.

Материалы и методы

В качестве исходных данных для изучения особенностей спектральных характеристик типовых загрязнений водных объектов использовались материалы авиационной и космической ГС-съёмки Кольского залива Баренцева моря и прибрежной зоны Чёрного моря вблизи Севастополя.

Выбранные для исследований акватории характеризуются интенсивной антропогенной нагрузкой, связанной с деятельностью крупных военно-морских баз, портов и различных промышленных объектов, расположенных в береговой черте. На водной поверхности практически постоянно наблюдаются многочисленные загрязнения (Евтушенко и др., 2016), что позволяет проводить детальные и статистически обоснованные исследования их характеристик.

Измерения спектральных сигнатур чистых и загрязнённых участков акватории выполнялись в разные годы специалистами Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского с борта самолёта Ан-30 с помощью авиационной ГС-съёмочной аппаратуры. В большинстве экспериментов задействовался видеоспектрометр разработки ЗАО «НПО «Лептон» (спектральное разрешение 0,4–13 нм, спектральный диапазон 402–1031 нм), реже — видеоспектрометр «Фрегат» (спектральное разрешение 5 нм, спектральный диапазон 480–950 нм), изготовленный Университетом ИТМО. Для радиометрической калибровки материалов аэросъёмки наземной группой синхронно регистрировались коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) специально выбранных тестовых поверхностей спектрорадиометром FieldSpec 3.0 (спектральное разрешение 3–10 нм, спектральный диапазон 350–2500 нм). В ходе экспериментов на Чёрном море также проводились натурные измерения (*in situ*) концентрации взвеси на опорных точках с привлечением судна экологического контроля «Петр Градов».

Наряду с материалами авиационных и наземных наблюдений для набора дополнительной статистики о спектральных свойствах морской поверхности использовались также данные, полученные ГС-аппаратурой космических аппаратов серии «Ресурс-П».

Атмосферная коррекция данных авиационной и космической ГС-съёмки осуществлялась в программе Modtran. Дальнейшая обработка производилась с помощью специально разработанного программного обеспечения и включала радиометрическую калибровку ГС-изображений по наземным тест-объектам, извлечение и статистический анализ спектральных сигнатур загрязнённых участков акватории с целью определения информативных спектральных признаков для классификации по цветности нефтяных плёнок и определения глубины распространения ВВ.

Для верификации результатов оценивания глубин акваторий на опорных точках использовались актуальные батиметрические карты.

Алгоритмы определения по ГС-данным показателей для оценивания вреда, причинённого водным объектам загрязнениями НП и ВВ

Решение задачи выявления вредных веществ в водных объектах по данным ГС-аэрокосмической съёмки базируется на знании отличительных особенностей спектральных характеристик чистой и загрязнённой воды. Применительно к НП и минеральным взвесям авторами была обоснована система спектральных признаков (Жуков, 2016), позволяющая при обработке ГС-изображений обнаруживать загрязняющие вещества, в том числе селектировать их от ряда неоднородностей морской поверхности (участков мелководья, зон распространения

фитопланктона и др.), имеющих с загрязнениями схожие спектры. Разработанные на основе этой системы алгоритмы и программы (Григорьева и др., 2017; Жуков, 2014; Жуков и др., 2013а, б) обеспечивают выделение контуров загрязнённых участков акватории, ранжирование плёнок НП по толщине (тонкие и мощные) и расчёт концентрации взвесей в водном объекте, тем самым позволяя определить отдельные показатели ($S_{НП}$, $S_{ВВ}$, $C_{ВВ}$), учитываемые в Методике.

Следует отметить, что ряд из предложенных спектральных признаков может быть использован только при обработке гиперспектральных изображений, так как данные многоспектральной съёмки не позволяют выявить тонкие спектральные различия, характерные для исследовавшихся объектов. Например, селекция минеральных ВВ от зон мелководья осуществляется по знаку производной функции КСЯ в узкой спектральной полосе 580–600 нм, а разделение тонких НП и биогенных взвесей — по значению максимума КСЯ на участке 500–550 нм.

Определение ущерба водному объекту от загрязнения минеральными взвешенными веществами

Для дальнейшей оценки ущерба, причинённого минеральными ВВ, необходимо расклассифицировать участки акватории на загрязнённые и незагрязнённые (условно чистые) исходя из установленного для рассматриваемого водного объекта уровня предельно допустимой концентрации ВВ ($ПДК_{ВВ}$), а также определить глубину распространения взвеси $h_{СР}$ в загрязнённых водах.

Вопрос расчёта $h_{СР}$ по данным ГС-съёмки является сложной задачей, требующей проведения дополнительных исследований. Вместе с тем для получения максимальных оценок прогнозируемого размера вреда можно ввести допущение о равномерном распределении взвеси во всей толще воды и принять $h_{СР}$ равной глубине акватории h в месте обнаружения загрязнения. Это предположение, как правило, может считаться корректным для прибрежных зон, которые характеризуются незначительными глубинами и в которых обычно наблюдаются сбросы минеральных ВВ.

При отсутствии батиметрических карт на обследованный водный объект для определения h может быть применён описанный в статье (Григорьева и др., 2016) алгоритм обработки ГС-данных, позволяющий на основе информации об отражательной способности водной поверхности и дна в нескольких спектральных интервалах видимого и ближнего инфракрасного (БИК) диапазонов спектра оценивать глубины прибрежных акваторий (шельфовой части и мелководья). Задача решается с помощью многопараметрических методов оптимизации (включая нейросетевые технологии), основанных на преимуществе многомерности ГС-данных и использовании модели переноса светового потока в водной среде, учитывающей процессы рассеивания и поглощения излучения растворенным «жёлтым» веществом, пигментами фитопланктона и минеральными взвесями.

Следует учитывать, что данный алгоритм обеспечивает получение приемлемых по точности результатов (с погрешностью 0,5–1 м) для значений $C_{ВВ}$, не превышающих ~50 мг/дм^3, так как при очень сильных концентрациях ВВ солнечное излучение может полностью рассеиваться взвесью, не достигая дна. В этом случае при оценочных расчётах в качестве $h_{СР}$ может быть принята глубина участка акватории, близлежащего к зоне столь сильного загрязнения.

Структурная схема методики автоматической обработки ГС-данных в задаче оценки вреда $У_{ВВ}$, нанесённого водному объекту загрязнением минеральными ВВ, показана на *рис. 1* (см. с. 237) (такса H и коэффициенты для расчёта $У_{ВВ}$ определяются по соответствующим таблицам, приведённым в Методике). $К_{ВГ}$, $К_{В}$, $К_{ДЛ}$ — нормированные (табличные) коэффициенты, учитывающие соответственно природно-климатические (сезонность) условия, региональные (характерные для конкретных водных бассейнов) экологические факторы и длительность негативного воздействия вредного вещества; $К_{ИН}$ — коэффициент инфляционной составляющей экономического развития.

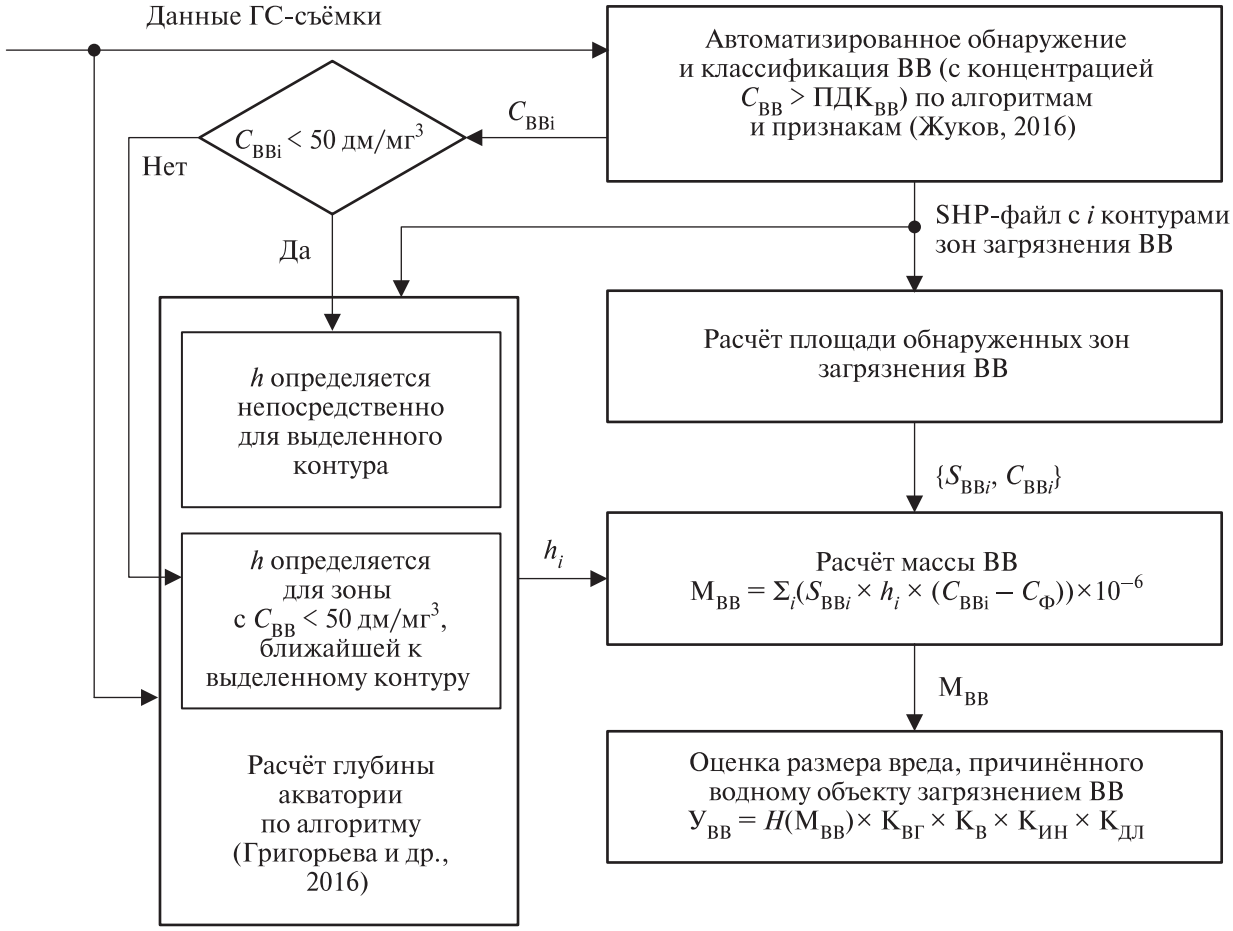

Рис. 1. Структурная схема методики обработки данных ГС-съёмки в задаче оценивания вреда, причинённого водным объектам загрязнениями минеральными ВВ

Обязательным условием для успешной реализации всех алгоритмов является обеспечение геопривязки и радиометрической калибровки обрабатываемых ГС-изображений.

Определение ущерба водному объекту от загрязнения нефтепродуктами

Рассмотренные в работах (Жуков, 2014, 2016; Жуков и др., 2013а, б) признаки и алгоритмы позволяют при обработке ГС-данных идентифицировать плёнки НП на поверхности воды и оценить их толщину — параметр, важный для оценки интенсивности загрязнения и прогноза изменения (растекания, испарения и др.) нефтяного пятна во времени. Вместе с тем однозначную зависимость между толщиной плёнки НП и её удельной массой или цветностью установить на практике достаточно сложно, что подтверждают существенные расхождения (в разы) в данных, приведённых в материалах разных авторов (Кахраманлы, 2012; Loos et al., 2012; Open water..., 2016).

Для решения этой проблемы были выполнены дополнительные исследования особенностей спектров отражения плёнок НП, отличающихся своими цветовыми характеристиками. В качестве исходных данных использовались ГС-изображения прибрежных участков акваторий Чёрного и Баренцева морей, полученные в разные годы сотрудниками Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского в ходе специально организованных аэросъёмочных работ. В результате для нефтяных плёнок, относящихся к различным классам по цветности (в соответствии с *таблицей*), были определены значения КСЯ (*рис. 2*, см. с. 238).

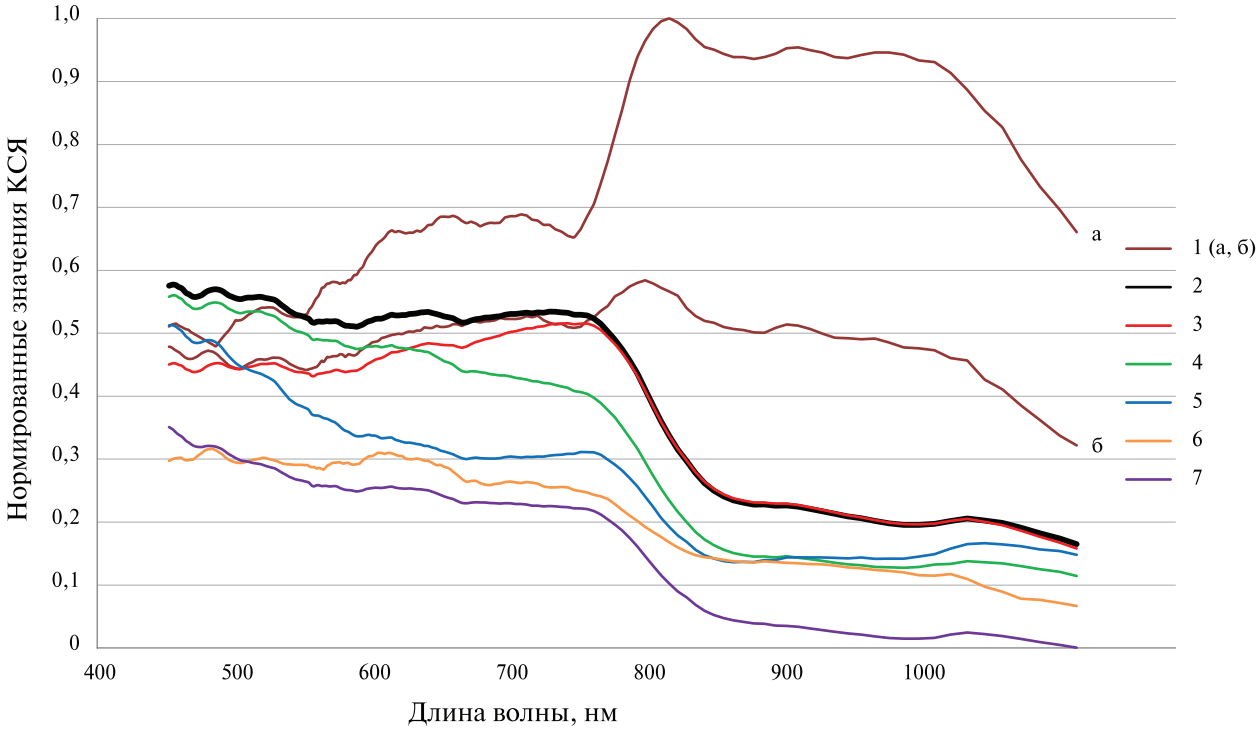

Рис. 2. Спектральные характеристики пленок НП различных классов по цветности (КСЯ нормированы в диапазоне значений от 0 до 1): 1(а, б) — 5-й класс, 2 — 4-й класс, 3 — 3-й класс (пленки красного цвета), 4 — 3-й класс (пленки зёленого цвета), 5 — 3-й класс (пленки синего цвета), 6 — 2-й класс, 7 — 1-й класс

Анализ спектров показал, что с использованием спектральных признаков, рассмотренных в работе (Жуков, 2016), в сформированный кластер мощных плёнок НП попадают нефтяные разливы темно-коричневого и чёрного оттенков, относящиеся к пятому классу по цветности. Для таких плёнок с изменением толщины наблюдаются достаточно существенные вариации спектральных сигнатур (графики 1а и б на *рис. 2*), но их основной отличительный спектральный признак — высокие значения яркостного контраста с водой в спектральном интервале 730–980 нм — имеет устойчивый характер. При этом в полосе 730–740 нм отмечается практически линейная зависимость КСЯ от толщины и удельной массы плёнки, что позволяет для оценки интенсивности загрязнения использовать следующее эмпирическое выражение, аппроксимирующее экспериментальные данные с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,22 г/м^2:

$$\text{УМ}_{\text{НП}} = a \cdot r^{\text{НП}}_{730-740} - b,$$

где $r^{\text{НП}}_{730-740}$ — КСЯ плёнки НП в интервале длин волн 730–740 нм; a, b — эмпирические коэффициенты линейной аппроксимации, a = 24,8 г/м^2, b = 0,87 г/м^2.

Остальные, более тонкие, нефтяные плёнки, попадающие в классы цветности с первого по четвёртый, характеризуются монотонным уменьшением значений КСЯ от видимого до БИК-диапазона спектра. Для их дальнейшей селекции могут быть использованы следующие особенности спектров, выявленные в ходе проведённых исследований.

1. Группы классов 1–2 и 3–4 разделяются между собой по значениям КСЯ в узкой спектральной полосе 440–450 нм, в пределах которой нефтяные плёнки классов 1–2 имеют вследствие меньшей флюоресценции более низкий, близкий к нулю, яркостной контраст с незагрязнённой водной поверхностью. Это позволяет для сегментации плёнок классов 1–2 от плёнок классов 3–4 использовать в качестве признака яркостной контраст С в соответствующем спектральном интервале, величина которого не должна превышать экспериментально определяемого порогового значения:

$$C_{440-450} = \frac{r^{\text{НП}}_{440-450} - r^{\text{ф}}_{440-450}}{r^{\text{НП}}_{440-450} + r^{\text{ф}}_{440-450}} < C_{\text{пор1}},$$

где $C_{\text{пор1}}$ — пороговый яркостной контраст, значения которого для исследовавшихся акваторий составляли менее 0,12; $r^{\text{НП}}_{440-450}$ и $r^{\text{ф}}_{440-450}$ — КСЯ соответственно плёнки НП и незагрязнённой воды (фона) в спектральном интервале 440–450 нм.

2. Основное отличие спектральных свойств плёнок классов 1 и 2 заключается в том, что первые в БИК области спектра (более 750 нм) имеют незначительные яркостные контрасты с чистой водой, так как солнечное излучение практически полностью, не отражаясь, проходит через такие очень тонкие плёнки. Данный факт можно формализовать в виде следующего признака селекции плёнок первого класса:

$$C_{750-850} = \frac{r^{\text{НП}}_{750-850} - r^{\text{ф}}_{750-850}}{r^{\text{НП}}_{750-850} + r^{\text{ф}}_{750-850}} < C_{\text{пор2}},$$

где $C_{\text{пор2}}$ — пороговый яркостной контраст, значение которого по результатам обработки экспериментальных ГС-данных можно рекомендовать на уровне 0,35.

3. Наиболее сложно при автоматической обработке ГС-данных разделяются плёнки 3-го и 4-го классов. Вместе с тем анализ их спектров позволяет отметить, что вследствие ярко выраженной цветности для плёнок третьего класса в полосе 440–650 нм характерно монотонное достаточно существенное уменьшение или увеличение КСЯ с длиной волны, в то время как у тусклых плёнок четвёртого класса изменения спектральной сигнатуры незначительны (*рис. 3*).

Отмеченная закономерность позволяет для идентификации плёнок четвёртого класса ввести следующий спектральный признак:

$$r'(\lambda_{440-650}) = -0{,}04 \ldots -0{,}01,$$

где $r'(\lambda_{440-650})$ — производная линейно аппроксимированной функции КСЯ нефтяной плёнки в спектральном интервале 440–650 нм.

Структурная схема методики оценивания вреда водным объектам от загрязнений НП, реализующей рассмотренные алгоритмы обработки данных ГС-съёмки, приведена на *рис. 4* (см. с. 240) и включает следующие основные этапы:

– обнаружение плёнок НП на поверхности воды, классификация их по толщине и цветности, определение площади и удельной массы плёнок различных классов;
– оценочный расчёт ожидаемого размера вреда $У_{\text{НП}}$, нанесённого загрязнениями.

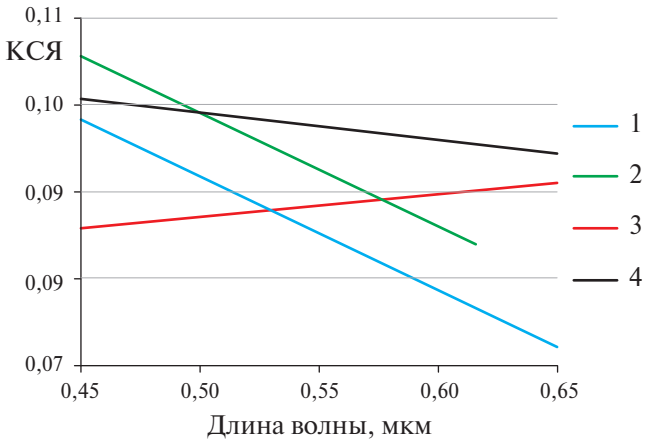

Рис. 3. Линейно аппроксимированные графики КСЯ в полосе спектра 440–650 нм для плёнок НП третьего (1 — синий цвет, 2 — зелёный цвет, 3 — красный цвет) и четвёртого (4) классов по цветности

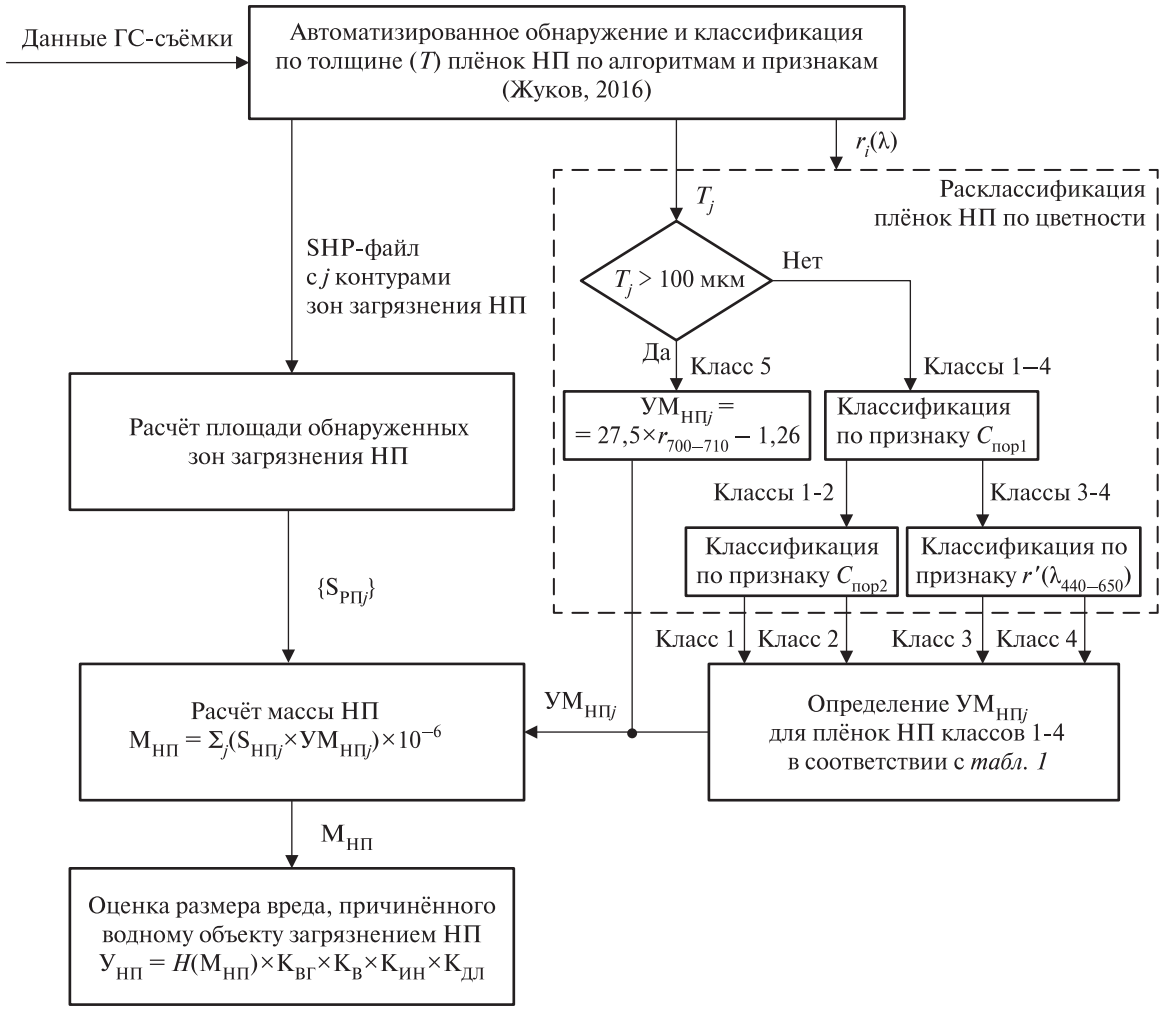

Рис. 4. Структурная схема методики обработки данных ГС-съёмки в задаче оценивания вреда, причинённого водным объектам загрязнениями НП

Выводы

Проведённые исследования показали возможность использования материалов ГС-аэрокосмической съёмки для оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам. Апробация разработанной методики по экспериментальным данным позволила не только выявить загрязнения акваторий нефтепродуктами и взвешенными веществами, но и оценить размер нанесённого вреда. При этом результаты сравнения натурных измерений на опорных точках с результатами расчётов по методике показали достаточно высокую точность определения интенсивности негативных воздействий с погрешностью не более 15 %.

Наиболее важным преимуществом методики является практически полная автоматизация процесса обработки. В созданной на её основе программе, примеры работы которой представлены на *рис. 5* и *6* (см. с. 241), от оператора требуется только введение справочной информации о бассейновой принадлежности водного объекта и установленных для него значениях фоновой и предельно допустимой концентраций ВВ.

Определяемые с помощью методики показатели эколого-экономического ущерба могут быть применимы для информационной поддержки деятельности органов государственной власти (Росприроднадзора), связанной с надзором в области использования и охраны водных объектов, а также при принятии управленческих решений по определению срочности и приоритетности мероприятий по ликвидации выявленных загрязнений акваторий.

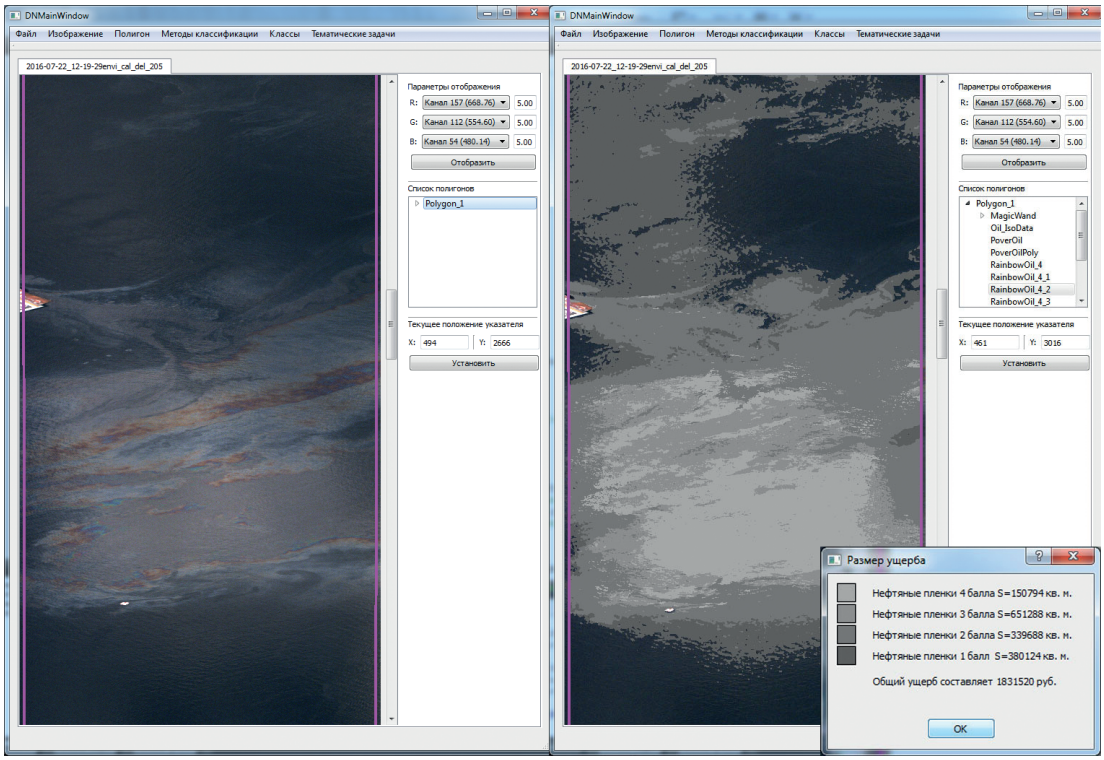

Рис. 5. Автоматизированное обнаружение плёнок НП и расчёт нанесённого ими вреда водному объекту (слева — исходное изображение, справа — результат обработки)

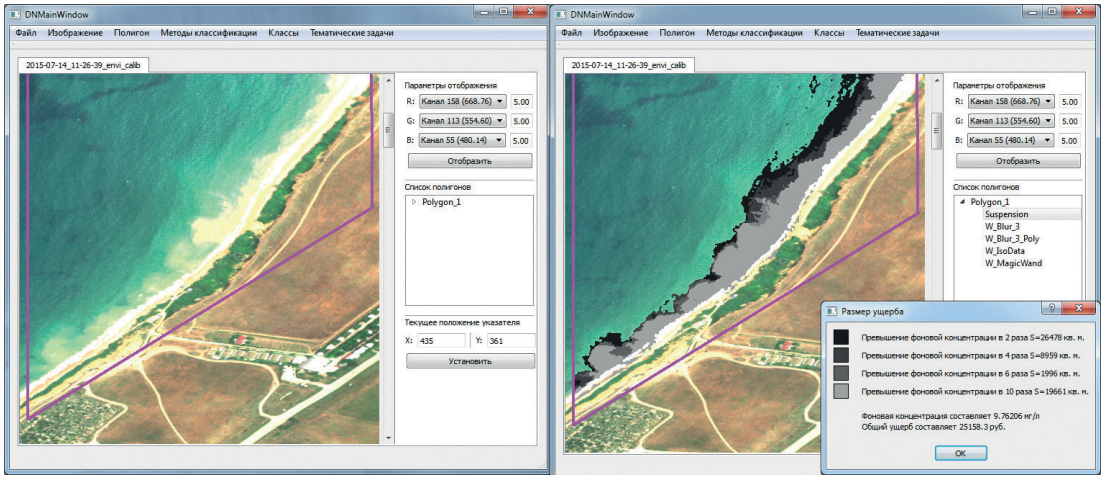

Рис. 6. Автоматизированное обнаружение ВВ и расчёт нанесённого ими вреда водному объекту (слева — исходное изображение, справа — результат обработки)

Литература

1. *Белов М. Л.*, *Городничев В. А.*, *Козинцев В. И.*, *Федотов Ю. В.* Неконтактный способ обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности воды. Патент РФ 2387977. Рег. 27.04.2010.
2. *Виноградов А. Н.*, *Егоров В. В.*, *Калинин А. П.*, *Родионов А. И.*, *Родионов И. Д.*, *Родионова И. П.* Исследования возможностей гиперспектральной съёмки для мониторинга состояния водных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 125–134.
3. *Григорьева О. В.*, *Жуков Д. В.*, *Марков А. В.*, *Саидов А. Г.* Способ оценки уровня загрязнения акваторий по гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования. Патент РФ 2616716. Рег. 17.04.2017.

4. *Григорьева О. В.*, *Жуков Д. В.*, *Марков А. В.*, *Мочалов В. Ф.* Восстановление глубин прибрежных акваторий по данным много- и гиперспектральной съёмки // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 553–559.
5. *Григорьева О. В.*, *Шилин Б. В.* Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 156–166.
6. *Евтушенко Н. В.*, *Иванов А. Ю.*, *Рыбчак Н. В.* Спутниковый радиолокационный мониторинг плёночных загрязнений Кольского залива // Земля из космоса. 2016. № 6 (22). С. 26–33.
7. *Жуков Д. В.* Методика тематической обработки гиперспектральных данных в задаче оценки экологического состояния портов // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 66–71.
8. *Жуков Д. В.* Спектральные признаки для идентификации типовых загрязнений акваторий морей по данным авиационной и космической съёмки // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 560–565.
9. *Жуков Д. В.*, *Григорьева О. В.*, *Марков А. В.*, *Саидов А. Г.* (2013а) Программа оценки уровня загрязнения акваторий морских портов по материалам много- и гиперспектральной съёмки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618799. Рег. 18.09.2013.
10. *Жуков Д. В.*, *Матьяш В. А.*, *Мочалов В. Ф.*, *Труфанов А. В.* (2013б) Системный анализ актуальных прикладных задач наземно-аэрокосмического мониторинга эколого-технологических объектов, исследуемых в проекте ELRI-184 // Труды СПИИРАН. 2013. № 5. Вып. 28. С. 107–121.
11. *Кахраманлы Ю. Н.* Пенополимерные нефтяные сорбенты: Экологические проблемы и их решения. Баку: Элм, 2012. 305 с.
12. *Копелевич О. В.*, *Буренков В. И.*, *Вазюля С. В.*, *Шеберстов С. В.*, *Терехова А. А.*, *Шибалкова А. П.* Учет отражения солнечного излучения от дна на мелководье при обработке данных спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 117–127.
13. *Лаврова О. Ю.*, *Костяной А. Г.*, *Лебедев С. А.*, *Митягина М. И.*, *Гинзбург А. И.*, *Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
14. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Уваров И. А.* Выявление и распознавание различных типов вод в прибрежной зоне Черного моря и в озерах Крыма на основе анализа гиперспектральных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 135–147.
15. *Мельников Г. С.*, *Самков В. М.*, *Товбин Б. С.*, *Дерин О. А.* Метод и аппаратура дистанционного обнаружения, распознавания и количественного анализа разливов нефти на морской поверхности // Труды 10-й Международ. конф. «Прикладная оптика-2012». 2012. Т. 3. С. 169–173.
16. *Митягина М. И.*, *Лаврова О. Ю.*, *Бочарова Т. Ю.* Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
17. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. Приказ Минприроды России № 87 от 13.04.2009 (ред. от 26.08.2015).
18. Радиотехнические и телевизионные системы: сб. науч. тр. / ред. Б. С. Тимофеева. СПб.: СПбГУАП, 2000. 178 с.
19. *Loos E.*, *Brown L.*, *Borstad G.*, *Mudge T.*, *Álvarez M.* Characterization of oil slicks at sea using remote sensing techniques // Oceans. 2012. Hampton Roads, VA, USA, 14–19 Oct. 2012. P. 1–4.
20. *Novoa S.*, *Doxaran D.*, *Ody A.*, *Vanhellemont Q.*, *Lafon V.*, *Lubac B.*, *Gernez P.* Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 1. P. 61.
21. Open water oil identification job aid for aerial observation: With standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes. Version 2. Updated July 2012. 2016. URL: http://www.response.restoration.noaa.gov/jobaid/orderform.
22. *Stumpf R. P.*, *Holderied K.* Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Liminology and Oceanography. 2003. V. 48. Iss. 1. P. 547–556.

The estimation technique of ecological-economic damage to water objects according to remote sensing data

O. V. Grigorieva, D. V. Zhukov, A. V. Markov, V. F. Mochalov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg 197198, Russia
E-mail: alenka12003@mail.ru

The article represents a method of data processing of aerospace hyperspectral data from the perspective of evaluating the damage caused to water bodies by oil products and mineral suspensions. The algorithms implemented in the method are based on the analysis of the distinctive spectral characteristics of harmful substances and allow determining their quantitative parameters, which are taken into account in the normative-methodical documents that set the calculation procedure of environmental-economic damage. The initial data used for the research of spectral characteristics of water pollution and the verification of the suggested algorithms were obtained as a result of special aerial survey in the Barents Sea and the Black Sea and as a result of data processing of space hyperspectral data. The presented information is the development of the earlier researches leaded by the authors. As the result of these researches the spectral features system was created to detect and define the level of negative impact on water bodies. In addition to the earlier developed algorithms, we propose the original methods of indices assessment that are necessary for the weight-calculation of harmful substances: the depth distribution of mineral suspensions and chromaticity of oil spills. For the assessment of depth we use multiple parameter techniques of optimization (including neural networks) based on the advantage of multidimensionality of hyperspectral data and the use of radiative transfer model in water that takes into account the radiation absorption and scattering of the gelbstoff, organic and mineral particles. The oil spills classification by chromaticity is based on the spectral features obtained as the result of the experiments conducted in narrow bands of visible and near infrared spectral range. As a whole the proposed algorithms allow defining the full set of initial data that is needed, in accordance with the laws, for the estimation of damage caused to water.

Keywords: hyperspectral remote sensing data, estimation of damage, pollution oil spill and mineral suspensions, informative spectral features

Accepted: 20.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-233-244

References

1. Belov M. L., Gorodnichev V. A., Kozintsev V. I., Fedotov Yu. V., *Nekontaktnyi sposob obnaruzheniya neftyanyh zagryaznenii na poverkhnosti vody* (Non contact method for detection of oil pollutions on water surface), Patent RU 2387977, Reg. 27.04.2010.
2. Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodinov A. I., Rodinov I. D., Rodinova I. P., Issledovaniya vozmozhnostei giperspektral'noi s″emki dlya monitoringa sostoyaniya vodnykh ob″ektov (Investigation of hyperspectral survey capabilities for monitoring water bodies state and water quality), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 125–134.
3. Grigor'eva O. V., Zhukov D. V., Markov A. V., Saidov A. G., *Sposob otsenki urovnya zagryazneniya akvatorii po giperspektral'nym dannym aerokosmicheskogo zondirovaniya* (Method of assessing the level of pollution sea water using hyperspectral remote sensing data), Patent RU 2616716, Reg. 17.04.2017.
4. Grigor'eva O. V., Zhukov D. V., Markov A. V., Mochalov V. F., Vosstanovlenie glubin pribrezhnykh akvatorii po dannym mnogo- i giperspektral'noi s″emki (The restoration of the coastal waters depths according to multi – and hyperspectral imagery), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 553–559.
5. Grigor'eva O. V., Shilin B. V., Opyt otsenki ekologicheskih kharakteristik akvatorii morskikh portov po dannym videospektral'noi aeros″emki (Experience in assessment of the environmental indicators of waters ports of hyperspectral images), *Sovremennye problemy distantsyonnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 156–166.
6. Evtushenko N. V., Ivanov A. Y., Rybchak N. V., Sputnikovyi radiolokatsyonnyi monitoring plenochnykh zagryaznenii Kol'skogo zaliva (Satellite radar monitoring of oil pollution of the Kola Bay), *Zemlya iz kosmosa*, 2016, No. 6 (22), pp. 26–33.

7. Zhukov D. V., Metodika tematiseskoy obrabotki giperspektral'nykh dannykh v zadache otsenki ekologicheskogo sostoyaniya portov (Technique of thematic processing of hyperspectral data to assess the ecological status of ports water), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 1, pp. 66–71.
8. Zhukov D. V., Spektral'nye priznaki dlya identifikatsii tipovykh zagryaznenii akvatorii morey po dannym aviatsionnoy i kosmicheskoy s″emki (Spectral features for identification of the typical pollution of the seaswaters, according to aviation and space imagery), *Optica atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 560–565.
9. Zhukov D. V., Grigor'eva O. V., Markov A. V., Saidov A. G., Zhukov D. V., *Programma otsenki urovnya zagryazneniya akvatorii morskikh portov po materialam mnogo- i giperspektral'noi s"emki v vidimom i blizhnem infrakrasnom diapazonakh spektra* (Software of assessing the level of pollution seaport using multi – and hyperspectral remote sensing data in the visible and near infrared bands), Certificate of state registration of software No. 2013618799 (RU), Reg. 18.09.2013.
10. Zhukov D. V., Mat'yash V. A., Mochalov V. F., Trufanov A. V., Sistemnyi analiz aktual'nykh prikladnykh zadach nazemno-aerokosmicheskogo monitoringa ekologo-tekhnologicheskikh ob″ektov, issleduemykh v proekte ELRI-184 (System analysis of actual applied tasks for ground-based and aerospace monitoring of natural-technological objects in ELRI-184), *Trudy SPIIRAN*, 2013, Vol. 5 (28), pp. 107–121.
11. Kakhramanly Yu. N., *Penopolimernye neftyanye sorbenty. Ekologicheskie problemy i ikh resheniya* (Oil foam absorbents. Environmental problems and their solutions), Baku: Elm, 2012, 305 p.
12. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Terekhova A. A., Shibalkova A. P., Uchet otrazheniya solnechnogo izlucheniya ot dna na melkovod'e pri obrabotke dannyh sputnikovykh skanerov tsveta (Accounting for the reflection of solar radiation from the bottom on shallow water in the processing of data of the satellite color scanners), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 117–127.
13. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I. Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morey Rossii* (Complex Satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p.
14. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Vyyavlenie I raspoznavanie razlichnykh tipov vod v pribrezhnoy zone Chernogo morya i v ozerakh Kryma na osnove analiza giperspektral'nykh dannykh, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 135–147.
15. Mel'nikov G. S., Samkov V. M., Tovbin B. S., Derin O. A., Metod i apparatura distantsionnogo obnaruzheniya, raspoznavaniya i kolichestvennogo analiza razlivov nefti na morskoi poverkhnosti (Method and remote sensing equipment for detection, identification and quantitative analysis of oil spills on the sea surface), *Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii "Prikladnaya optika-2012"*, 2012, Vol. 3, pp. 169–173.
16. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Sputnikovyi monitoring neftyanykh zagryaznenii morskoy poverkhnosti, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 130–149.
17. *Minprirody of Russia: Order No. 87*, Date 13.04.2009 (Rev. 26.08.2015).
18. *Radiotekhnicheskie i televizionnye sistemy* (Radio engineering and television systems), B. S. Timofeeva (ed.), St. Peterburg: SPbGUAP, 2000, 178 p.
19. Loos E., Brown L., Borstad G., Mudge T., Álvarez M., Characterization of oil slicks at sea using remote sensing techniques, *Oceans*, *2012*, Hampton Roads, VA, USA, 14–19 Oct. 2012, pp. 1–4.
20. Novoa S., Doxaran D., Ody A., Vanhellemont Q., Lafon V., Lubac B., Gernez P., Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters, *Remote Sens.*, 2017, Vol. 9 (1), p. 61.
21. *Open water oil identification job aid for aerial observation: With standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes*. Version 2. Updated July 2012, 2016, URL: http://www.response.restoration.noaa.gov/jobaid/orderform.
22. Stumpf R. P., Holderied K., Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Liminology and Oceanography*, 2003, Vol. 48 (1), pp. 547–556.