

УДК 528.88 556

Спектральные признаки для идентификации типовых загрязнений акваторий морей по данным авиационной и космической съемки

Д.В. Жуков*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13*

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

Рассматриваются особенности спектральных характеристик чистых и загрязненных водных объектов, выявленные на основе теоретических и экспериментальных исследований. Сформирована оригинальная система устойчивых спектральных признаков, которые могут использоваться для идентификации и определения качественных и количественных показателей загрязнений морей нефтепродуктами и минеральными взвесями.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, нефтепродукты, минеральные взвеси, коэффициент спектральной яркости, обработка материалов авиакосмической съемки, система спектральных признаков; hyperspectral sensing, petroleum products, mineral particles, spectral brightness coefficient, space imagery processing, system of spectral characteristics.

Введение

В настоящее время все более широкие возможности для проведения экологических обследований водных объектов предоставляют авиационные и космические средства наблюдения, которые обеспечивают оперативный мониторинг больших по площади акваторий и определение местоположения и контуров разливов загрязняющих веществ. Вместе с тем традиционно используемая съемочная аппаратура (фотографическая, тепловизионная, радиолокационная) в автоматизированном режиме, как правило, выполняет только задачу обнаружения вредных веществ. Для более детальной идентификации загрязнений привлекаются квалифицированные специалисты-дешифровщики, но и они не способны определить все требуемые для оценки экологической обстановки показатели, так как целый ряд из них невозможно выявить при визуальном анализе материалов аэрокосмической съемки.

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность применения новых методов и средств дистанционного зондирования, позволяющих не только оперативно проводить экологические обследования акваторий, но и при обработке зарегистрированных снимков быстро и достоверно обнаруживать и классифицировать загрязнения, характерные для водных объектов, в автоматическом или автоматизированном режиме.

Решение данной задачи стало принципиально возможным с началом эксплуатации авиационной и космической гиперспектральной (ГС) аппаратуры

наблюдения (видеоспектрометров), формирующей массивы попиксельно совмещенных изображений подстилающей поверхности в узких полосах электромагнитного спектра излучений. Обработка таких данных позволяет проводить классификацию различных объектов на основе знания отличительных особенностей их спектральных характеристик. В качестве эталонной информации при этом используются специально определяемые (уникальные для рассматриваемых объектов) спектральные признаки, которые для обеспечения достоверных результатов идентификации должны обладать устойчивостью к изменениям внешних факторов.

Применительно к тематической обработке ГС-данных экологического обследования водных объектов требуется наличие целой системы спектральных признаков, необходимых не только для классификации типовых загрязняющих веществ, но и для селекции ряда неоднородностей морской поверхности (участков мелководья, зон распространения фитопланктона и др.), имеющих с этими загрязнениями схожие спектры.

Особенности спектральных характеристик чистой морской поверхности

Морская вода представляет собой сложную физико-химико-биологическую систему, оптические свойства которой существенно зависят от состава и физического состояния (температуры, наличия волн и др.). Вместе с тем имеются общие закономерности отражения, поглощения и рассеивания потоков излу-

* Денис Валерьевич Жуков (spb_pillgrim@rambler.ru).

чения в морской среде, в которой основными оптически активными компонентами являются собственно вода, растворенные в ней неорганические и органические вещества и взвесь (минеральная и органическая) [1].

Спектр чистой морской воды (т.е. воды, содержащей растворенные минеральные соли при отсутствии взвешенных частиц) преимущественно формируется под влиянием процесса поглощения солнечного излучения. Уже в поверхностном слое водного объекта ослабляется большая часть потока излучения в ультрафиолетовой, красной и ближней инфракрасной (БИК) полосах спектра, что приводит с увеличением глубины к смещению максимума спектральной характеристики в область более коротких волн (синий и зеленый участки).

Процессы рассеяния и отражения в чистой морской воде не оказывают столь значительного влияния на форму спектральной сигнатуры. Эффект рассеяния светового потока наиболее важную роль играет в случае содержания в воде взвешенных минеральных и органических веществ. Отражение солнечного излучения может быть существенным лишь при съемке «бликов», которые наблюдаются при зеркальном отражении солнца от взволнованной морской поверхности.

В целом анализ оптических свойств чистой воды позволяет выделить следующие особенности спектральных сигнатур поверхности моря в диапазоне спектра от 400 до 1000 нм, в котором функционируют большинство современных авиационных и космических видеоспектрометров:

- низкие значения (менее 0,05) коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) с небольшим подъемом (до 0,1) в синей области спектра [2];

- увеличение значений КСЯ в красном и БИК-участках спектра для мелководных (глубины менее 10 м) акваторий за счет переотражения части солнечного излучения от морского дна с открытым (не покрытым растительностью) грунтом из известковых или кремнистых пород.

Особенности спектральных характеристик морской поверхности, загрязненной минеральными взвесями

Наиболее характерными загрязнениями водных объектов, по наличию которых можно сделать предварительную оценку экологического состояния обследуемой акватории, являются тонкие и мощные пленки нефтепродуктов, а также минеральные (терригенные) взвеси, которые адсорбируют на своей поверхности растворенные в воде вредные примеси, а также задерживают развитие или полностью прекращают жизнедеятельность донных микроорганизмов, участвующих в процессе самоочищения вод [3].

При наличии взвеси рассеяние солнечного излучения ее частицами оказывает значимое влияние на форму спектральной сигнатуры морской поверхности. Ввиду преобладания диффузного характера отражения светового потока от поверхности мелкодис-

персных твердых частиц, часть излучения возвращается обратно в атмосферу, часть многократно переотражается от других частиц [1]. При этом за счет увеличения пробега квантов света в водной толще поглощение солнечного излучения в красной и БИК-областях спектра происходит более интенсивно.

Результатирующее воздействие происходящих в морской воде процессов отражения и поглощения излучения определяет спектральные характеристики водного объекта, загрязненного терригенными взвесями. Так как спектральная отражательная способность минеральных частиц в видимом и БИК-диапазонах имеет вид монотонно возрастающей функции, значения КСЯ морской поверхности в коротковолновой области спектра растут с увеличением длины волны, а далее уменьшаются, когда начинает преобладать эффект поглощения. В результате в красной области спектра наблюдается локальный максимум спектральной характеристики.

С увеличением концентрации терригенной взвеси влияние процессов диффузного отражения становится все более существенным, вызывая рост значений КСЯ в красной полосе и смещение локального максимума сигнатуры в длинноволновую часть спектра [4]. Положение и значение данного максимума могут рассматриваться в качестве информативных признаков для выявления и определения количества минеральных взвешенных веществ в морской воде.

Следует отметить, что схожую форму спектральной сигнатуры имеют также участки мелководных акваторий с песчаным или галечным типом дна. Задача их селекции от водных объектов, загрязненных минеральными взвесями, может решаться по имеющимся отличиям спектральных характеристик в красном и БИК-участках спектра, обусловленных разным механизмом ослабления в воде излучения, рассеянного на частицах взвеси и отраженного от морского дна.

Идентификация в морской воде органических (биогенных) взвесей, представленных различными видами фитопланктона, осуществляется по характерным особенностям их спектральной сигнатуры, связанным с наличием двух сильных полос поглощения хлорофилла в синем и красном участках спектра. Значения расположенного между этими полосами локального максимума функции КСЯ в зеленой области спектра (520–560 нм) используются для оценки концентрации органических веществ.

Выделение терригенных взвесей на фоне биогенных предпочтительнее осуществлять в красной полосе поглощения хлорофилла ввиду малых величин идущих из водной толщи яркостных сигналов в синем диапазоне.

Особенности спектральных характеристик морской поверхности, загрязненной нефтепродуктами

Оптические свойства нефтяных пленок на морской поверхности определяются следующими факторами:

- отражением и преломлением светового излучения на границах сред «атмосфера – нефтяная пленка» и «нефтяная пленка – морская вода»;

- флуоресценцией веществ, содержащихся в нефтепродуктах, под воздействием ультрафиолетовых лучей;

- поглощением и диффузным отражением солнечной радиации веществами, входящими в состав нефтепродуктов.

Разница в значениях показателей преломления нефтяной пленки (от 1,48 до 1,67) и морской воды (от 1,34 до 1,35) [1, 5] определяет преимущественно положительные контрасты в видимом и БИК-диапазонах спектра между загрязненной нефтепродуктами (НП) и чистой морской поверхностью.

Эффект флуоресценции обуславливает дополнительное излучение от нефтяных пленок, которое в зависимости от состава НП может проявляться как в фиолетовой (400–450 нм), так и в более длинноволновых (до 550 нм) полосах спектра [5–7]. С ростом толщины пленки, вследствие увеличения количества флуоресцирующих веществ, это излучение усиливается.

Процессы поглощения и диффузного отражения солнечной радиации наиболее значимы для тяжелых НП, содержащих асфальтосмолистые вещества, продукты окисления углеводов и некоторые непредельные и ароматические углеводороды. Пропускание потока излучения сквозь пленку НП возрастает с увеличением длины волны (рис. 1). При этом наиболее значительная разница в значениях функции пропускания между тонкими (толщиной 15–30 мкм) и мощными (толщиной более 100 мкм) нефтяными пленками проявляется в красной и БИК-областях спектра, где для тяжелых НП преобладающими становятся эффекты диффузного отражения. Для пленочных НП толщиной от 30 до 100 мкм, ввиду возможных вариаций значений КСЯ под влиянием различных факторов, затруднительно выявить спектральные признаки, позволяющие однозначно разделить их с тонкими и мощными нефтяными пленками, поэтому при дешифрировании ГС-данных они могут быть отнесены к любому из этих классов.

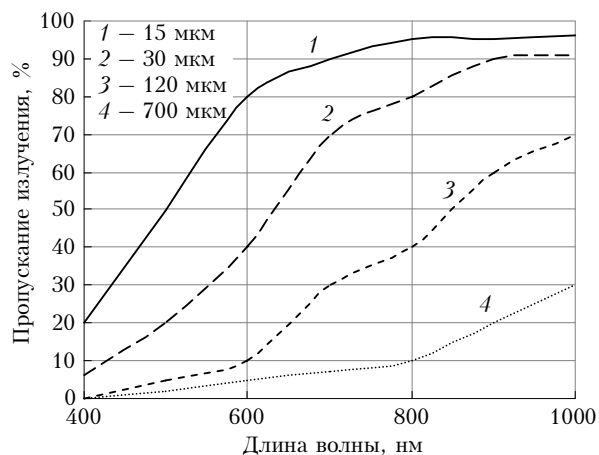


Рис. 1. Функции пропускания солнечной радиации через слои мазута различной толщины [8]

Отмеченные закономерности подтверждаются данными экспериментальных исследований. В работе [9] показано, что для нефтяных пленок толщиной более 100 мкм во всем видимом диапазоне спектра характерны достаточно высокие по сравнению с чистой морской водой значения КСЯ (от 0,14 до 0,2). В спектре этих пленок наблюдается (рис. 2) рост значений КСЯ как в длинноволновом диапазоне (700–1000 нм), обусловленный диффузным отражением солнечной радиации, так и в фиолетовой и синей областях спектра вследствие флуоресценции.

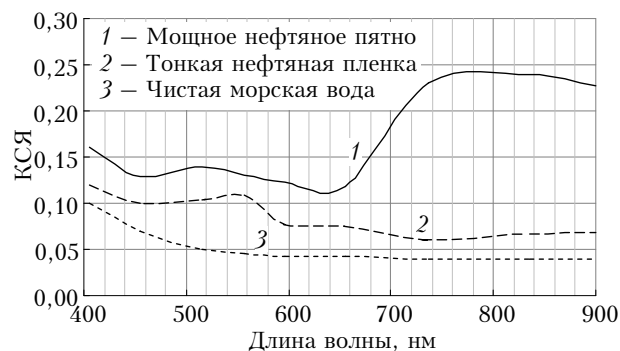


Рис. 2. Спектральные сигнатуры нефтяных пленок на воде и чистой морской поверхности [9]

У тонких пленок НП, наоборот, происходит уменьшение КСЯ в БИК-диапазоне до значений, близких к величинам КСЯ чистой морской воды. Дополнительно затрудняет идентификацию данного вида загрязнений наличие обусловленного флуоресценцией локального максимума в зеленой полосе (в интервале длин волн от 500 до 550 нм), который также характерен для участков акваторий с высокой концентрацией хлорофилла *a*. Указанные особенности спектральных характеристик определяют необходимость использования для разделения тонких нефтяных пленок и зон фитопланктона фиолетовой части спектра, в которой за счет флуоресценции наблюдаются повышенные значения КСЯ НП.

Система спектральных признаков для идентификации типовых загрязнений акваторий морей по данным ГС-съемки

Проведенный анализ известных из теории особенностей спектральных характеристик чистой и загрязненной морской поверхности позволяет обосновать информативные спектральные диапазоны, которые потенциально могут быть использованы для решения задач идентификации вредных веществ в воде при автоматическом дешифрировании ГС-данных.

Схожий подход при изучении гидрооптических свойств водных объектов рассматривался и в ряде работ других авторов [5–7, 10, 11], однако эти исследования имели преимущественно качественный характер. Вместе с тем для обеспечения результа-

тивной обработки необходимым условием является наличие системы формализованных (в виде математических зависимостей) показателей, которые в выбранных диапазонах должны обеспечивать уверенное обнаружение контролируемых загрязнений и быть максимально чувствительными к их изменениям для получения количественных оценок степени вреда, нанесенного окружающей среде. Важными условиями практической ценности этих показателей являются также возможность их применения (при необходимости посредством соответствующей модификации) для акваторий с различными гидрооптическими свойствами и устойчивость к изменениям различных внешних факторов.

С целью формирования такой системы Военно-космической академией им. А.Ф. Можайского в 2009–2015 гг. был проведен комплекс аэросъемочных работ, в рамках которых целенаправленно выполнялась ГС-съемка прибрежных зон Финского залива, Баренцева и Черного морей. Всего было проведено более 20 этапов разносезонных экспериментов, позволивших получить около 300 реализаций массивов ГС-данных для различных участков акваторий. В большинстве случаев синхронно с авиационными выполнялись также наземные (морские) спектрофотометрические измерения, необходимые для повышения точности калибровки аэрокосмических ГС-изображений. В дополнение к аэросъемочным материалам были обработаны космические снимки тех же акваторий, зарегистрированные ГС-камерами космических аппаратов «Ресурс-П» (Россия) и EO-1 (США).

Анализ измеренных в ходе экспериментов спектральных сигнатур нефтяных пленок на морской поверхности (рис. 3) позволил сделать следующие выводы.

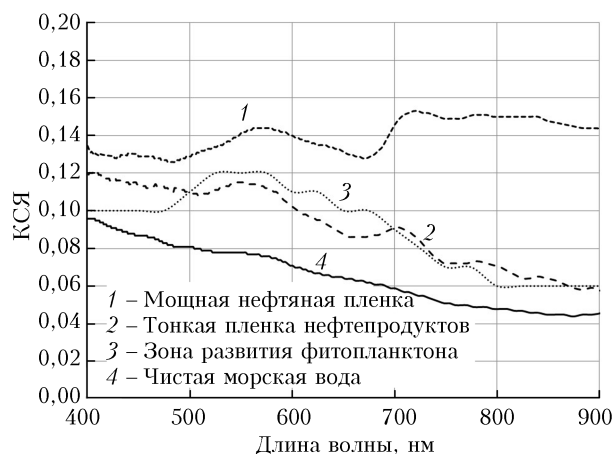


Рис. 3. Спектральные сигнатуры пленок нефтепродуктов, зон развития фитопланктона и чистой морской воды (доверительный интервал для значений КСЯ с надежностью 0,95 находится в пределах от 0,002 до 0,014)

Во-первых, для пленочных НП любой толщины на фоне чистой морской воды характерны высокие значения (более 0,16) яркостного контраста C в спектральном интервале 500–590 нм, что позво-

ляет идентифицировать данный вид загрязнений на ГС снимках по следующему признаку (необходимо отметить, что в выделенные кластеры также могут попасть зоны распространения фитопланктона):

$$C = \frac{r_{500-590}^o - r_{500-590}^{\phi}}{r_{500-590}^o + r_{500-590}^{\phi}} > 0,16. \quad (1)$$

Здесь $r_{500-590}^o$ и $r_{500-590}^{\phi}$ – КСЯ анализируемого участка и КСЯ чистой морской воды в спектральном интервале 500–590 нм.

Во-вторых, наиболее эффективным показателем для выявления мощных пленок НП является величина яркостного контраста в интервале длин волн 730–980 нм. Спектральный признак, позволяющий выделить загрязнение морской воды мощными нефтяными пленками, можно задать в виде следующего соотношения:

$$C_{\text{por1}} < C = \frac{r_{730-980}^o - r_{730-980}^{\phi}}{r_{730-980}^o + r_{730-980}^{\phi}} < C_{\text{por2}}, \quad (2)$$

где C_{por1} и C_{por2} – пороговые контрасты, значения которых определяются региональными особенностями (для исследовавшихся акваторий величины C_{por1} и C_{por2} были установлены в диапазонах 0,42–0,48 и 0,67–0,73 соответственно).

В-третьих, для спектральных сигнатур пленок НП характерны сравнительно небольшие различия в значениях КСЯ в фиолетовом (400–420 нм) и зеленом (500–550 нм) участках спектра. Данный факт целесообразно использовать при выборе признака для селекции нефтяных пленок от биогенных взвесей, который математически может быть описан следующим выражением:

$$\frac{r_{500-550}^{\max}}{r_{400-420}} \approx 1, \quad (3)$$

где $r_{500-550}^{\max}$ – максимальное значение КСЯ в интервале длин волн 500–550 нм; $r_{400-420}$ – значение КСЯ в спектральном интервале 400–420 нм.

Исследование спектральных характеристик участков загрязнения акваторий взвешенными веществами подтвердило, что минеральные взвеси характеризуются положением максимума спектральной сигнатуры в интервале длин волн от 590 до 710 нм (рис. 4), что позволяет использовать эту полосу спектра как для обнаружения взвешенных веществ, так и для получения количественных оценок их концентрации $C_{\text{вв}}$, например с помощью предложенной автором эмпирической зависимости

$$C_{\text{вв}} = e^{\frac{r_{590-710} + 0,044}{0,043}}. \quad (4)$$

Следует отметить, что для выделения терригенных взвесей на фоне мощных пленок НП, также имеющих максимум сигнатуры в интервале 600–690 нм, может использоваться спектральный признак, задаваемый выражением (2).

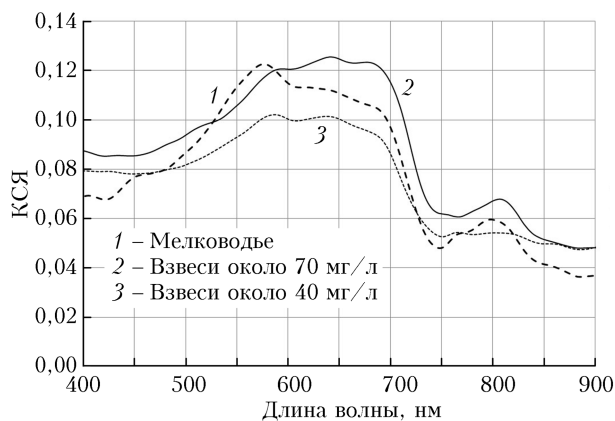


Рис. 4. Спектральные сигнатуры минеральных взвесей различных концентраций и зоны мелководья (доверительный интервал для значений КСЯ с надежностью 0,95 находится в пределах от 0,001 до 0,004)

Полученные экспериментальные спектральные сигнатуры мелководья и районов загрязнения воды минеральными взвесями (см. рис. 4) соответствуют теоретическим представлениям о закономерностях отражения, поглощения и рассеивания потоков излучения в морской среде. В интервале длин волн 400–580 нм происходит возрастание значений КСЯ за счет отражения солнечного излучения в одном случае от частиц взвеси, в другом — от песчаного дна. Далее наступает равновесие между эффектами поглощения и отражения солнечного излучения. Однако отраженное от дна солнечное излучение, проходя вторично через толщу морской воды, поглощается более интенсивно, чем в случае диффузного переотражения от частиц взвеси. За счет этого для акваторий с малыми глубинами характерно снижение значений КСЯ, начиная с длин волн в районе 580 нм, что приводит к появлению локального максимума спектральной сигнатуры в области спектра 540–600 нм. Данная особенность позволяет ввести для выделения зон мелководья следующий признак:

$$r'(\lambda_{580-600}) < 0, \quad (5)$$

где $r'(\lambda_{580-600})$ — производная функции КСЯ в спектральном интервале 580–600 нм.

В дополнение к задаваемой соотношениями (1)–(5) системе спектральных признаков для оценки состояния водоемов можно использовать также показатели, позволяющие определять концентрацию органических взвесей в морской воде. Эта задача решается с помощью известных биооптических алгоритмов [11], основанных на анализе значений КСЯ в узких каналах зеленого диапазона спектра. Например, при оценке содержания хлорофилла в морской воде по данным спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Aqua (США), рекомендуется применять следующую формулу:

$$C_{chl} = 10^{0,366 - 3,067R + 1,93R^2 + 0,649R^3 - 1,532R^4}, \quad (6)$$

где C_{chl} — концентрация хлорофилла *a* в морской воде, мг/м³; $R = \lg(r_{510}/r_{555})$ — логарифм отноше-

ния КСЯ в каналах, соответствующих длинам волн 510 и 555 нм.

Заключение

Теоретическое обоснование и большое количество экспериментальных данных об отражательной способности водной среды подтверждают устойчивость предложенных в статье спектральных признаков для идентификации типовых загрязнений водных объектов по данным авиационной и космической ГС-съемки. На основе этих признаков разработан алгоритм [3] и программа [12] автоматизированной обработки ГС-изображений в интересах оценки экологического состояния акваторий морей, которые были апробированы при проведении экологического обследования Черного и Баренцева морей вдоль побережья Крымского и Кольского полуостровов соответственно. Полученные результаты [13, 14] позволили сформировать достаточно точные оценки экологического состояния контролируемых участков акваторий, которые были подтверждены данными специально проведенных морских исследований.

1. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
2. Григорьева О.В., Шилин Б.В. Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 156–166.
3. Жуков Д.В. Автоматизированное обнаружение загрязнений прибрежных участков акваторий морей на основе обработки материалов аэрокосмической гиперспектральной съемки // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 66–68.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 343 с.
5. Дейдан Т.А., Пацаева С.В., Фадеев В.В., Южак В.И. Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объеме воды // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 4. С. 455–463.
6. Черепанова Е.А. Дистанционный мониторинг нефтяных загрязнений в водной среде. СПб.: РГГМУ, 2008. 179 с.
7. Бреховских Ю.П. Авиационные наблюдения и контроль над загрязненностью вод суши и морей. Методические указания. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 192 с.
8. Шехтер Ф.Н., Кропоткин М.А., Шевелева Т.Ю. Влияние поверхностных пленок загрязняющих веществ на световой и тепловой режим воды // Труды ГГО, 1979. Вып. 423. С. 11–21.
9. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. Часть 1. Л.: МО СССР, 1986. 160 с.
10. Loos E., Brown L., Borstad G., Mudge T., Blvarez M. Characterization of oil slicks at sea using remote sensing techniques // OCEANS. 2012. Hampton Roads, VA, 14–19 Oct. 2012. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6405033
11. Федилов Ю.В. Разработка и создание информационной технологии дистанционного определения параметров первичной продуктивности в системах мониторинга океана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский гос. ин-т электроники и математики, 2003. 17 с.

12. Жуков Д.В., Григорьева О.В., Марков А.В., Саидов А.Г. Программа оценки уровня загрязнения акваторий морских портов по материалам много- и гиперспектральной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра: Св-во о гос. рег. пр-мы для ЭВМ № 2013618799, рег. 18.09.2013.
13. Морозова Е.С., Марков А.В., Григорьева О.В., Мочалов В.Ф. Оценка экологического состояния акватории Кольского залива по данным аэросъемки // Труды II Всерос. науч. конф. «Экология и космос» им. Академика К.Я. Кондратьева. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. С. 174–176.
14. Жуков Д.В., Марков А.В., Григорьева О.В. Результаты применения комплекса синхронных судовых и гиперспектральных авиационных средств экологического контроля для обследования акватории Севастопольской бухты // Труды II Всерос. науч. конф. «Экология и космос» им. Академика К.Я. Кондратьева. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. С. 131–133.

D.V. Zhukov. Spectral features for identification of the typical pollution of sea waters from aviation and space imageries.

The paper explores the features of the spectral characteristics of clean and contaminated water bodies identified on the basis of theoretical and experimental research. The original system of stable spectral features has been formed and can be used to identify and define qualitative and quantitative characteristics of sea pollution by oil products and mineral suspensions.