

Восстановление глубин прибрежных акваторий по данным много- и гиперспектральной съемки

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

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

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

Рассматривается метод актуализации глубин прибрежных акваторий по данным много- и гиперспектральной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Восстановление глубины для каждого элемента изображения производится на основе решения обратной задачи, заключающейся в обучении искусственной нейронной сети с помощью полуаналитической модели переноса излучения в воде, учитывающей эффекты рассеивания и поглощения света в подводном световом поле, как минимум в трех информативных спектральных каналах для каждого типа дна. При этом предусмотрена возможность корректировки процесса обучения с помощью регрессионных алгоритмов определения органических и минеральных примесей в воде по их натурным измерениям. Выполнено пополнение библиотеки спектральных характеристик различных типов дна и найдены информативные признаки их идентификации. Результаты апробированы по данным авиационных и космических гиперспектральных съемок.

Ключевые слова: батиметрия, гиперспектральные данные, коэффициент спектральной яркости, показатели поглощения и рассеивания света водой; bathymetry, hyperspectral data, reflectance, absorption and scattering of light in water.

Введение

Интенсивное освоение прибрежной части морей и шельфовых зон в результате добычи полезных ископаемых, дноуглубительных работ и намыва территорий приводит к изменению рельефа дна, что требует периодической актуализации информации о глубинах в прибрежной части морей для обеспечения безопасности судоходства. Для решения этой задачи эффективно могут задействоваться средства дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать сведения о состоянии водных объектов (для глубин до 20–25 м в случае чистой океанической воды [1]) по результатам измерений восходящего излучения над поверхностью моря. Развитие технологий получения и обработки данных гиперспектральной (ГС) съемки, а также создание многоспектральных (МС) систем с большим числом каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра предоставляют возможность для изготовления и актуализации батиметрических карт в оперативном режиме с существенно меньшими затратами по сравнению с традиционными многолучевыми корабельными эхолотами.

Известные аэрокосмические методы изучения глубин прибрежной мелководной зоны используют

эмпирический подход, который основан на анализе изображений в двух участках спектра – фиолетовом (400–450 нм) и желтом (580–620 нм). Он имеет ряд недостатков, обусловленных возможностью мониторинга только чистой воды и необходимостью получения опорной информации о глубинах для построения регрессионной зависимости между глубиной и значениями коэффициентов отражения для каждого типа дна.

Первые материалы, доказывающие возможность применения этих двух спектральных каналов для оценки прибрежных акваторий, были опубликованы Lyzenga еще в 1978 г. и развиты Stumpf [2, 3]. Метод сводится к аппроксимационной оценке глубин в фиолетовом диапазоне, где отсутствует влияние на показатель ослабления взвешенных минеральных веществ, и в желтом диапазоне, где минимально поглощение пигментами фитопланктона.

Действительно, в полосе спектра 400–450 нм наблюдаются наименьшие показатели ослабления солнечного излучения в прозрачных водах лимническими составляющими (растворенными и взвешенными органическими веществами, неорганическими солями, минеральными взвесями и др.). В чистой воде для длины волны $\lambda = 470$ нм поток излучения может проникать на глубины 10–20 м, в то время как для $\lambda = 750$ нм он практически полностью ослабевает в слое 0,2–0,4 м [4]. Вместе с тем существенное воздействие на оптические свойства водной толщи в фиолетовом и синем диапазонах спектра могут оказывать фитопланктон и растворенные

* Ольга Викторовна Григорьева (alenka12003@mail.ru); Денис Валерьевич Жуков (spb_pilligim@rambler.ru); Андрей Викторович Марков (markov_av69@mail.ru); Виктор Федорович Мочалов.

органические вещества, которые значительно влияют на пропускание света, увеличивая поглощение в коротковолновой области спектра. Вклад пигментов фитопланктона в область синего максимума поглощения составляет около 35% для высокопродуктивных морских и океанических вод [5]. Поэтому при наличии органики в виде фитопланктона оценка глубины должна быть проведена с учетом концентрации хлорофилла.

Указанные обстоятельства обусловили актуальность разработки рассматриваемого в статье метода определения глубин прибрежных акваторий, который основан на применении полуаналитического алгоритма оценки переноса излучения в морской среде, учитывающей влияние ослабления излучения в воде и вклад альбедо дна в яркость водной поверхности [4, 6]. Основным отличием метода от известных аналогов [2, 3] является независимость от наличия исходных данных о глубинах в опорных точках, так как восстановление глубины осуществляется в результате обучения искусственной нейронной сети (ИНС) с помощью уравнения переноса излучения в водной толще в наиболее информативных спектральных каналах. При обучении используется алгоритм обратного распространения ошибки, который относится к семейству методов оптимизации, в частности к методу градиентного спуска.

Обобщенная схема используемой технологии представлена на рис. 1 и состоит из следующих элементов: предварительная обработка, включающая атмосферную коррекцию данных и коррекцию сол-

нечных бликов; тематическая обработка, состоящая из этапа классификации дна на два основных типа (водоросли и грунты) и этапа восстановления глубины прибрежных участков моря. Далее последовательно изложены используемые методы.

Обучающая площадь и исходные данные

Получение экспериментальных данных об отражательных характеристиках прибрежных участков моря и апробация предлагаемого алгоритма оценки глубин проводились по результатам летно-экспериментальных исследований, организованных Военно-космической академией им. А.Ф. Можайского над акваторией Черного моря (в районе Севастопольской бухты, населенных пунктов Кача и Коктебель).

В процессе экспериментальных исследований были задействованы авиационный видеоспектрометр НПО «Лептон» (спектральное разрешение 0,4–3 нм, спектральный диапазон 402...1031 нм) и наземный спектрорадиометр FieldSpec 3.0 (спектральное разрешение 3–10 нм, спектральный диапазон 350...2500 нм). В дополнение к данным авиационных и морских измерений использовались материалы гиперспектральной аппаратуры с российского космического аппарата (КА) «Ресурс-П».

С помощью спектрорадиометра FieldSpec 3.0 были измерены коэффициенты спектральной яркости $r(\lambda)$ дна в прибрежной зоне (рис. 2), используемые

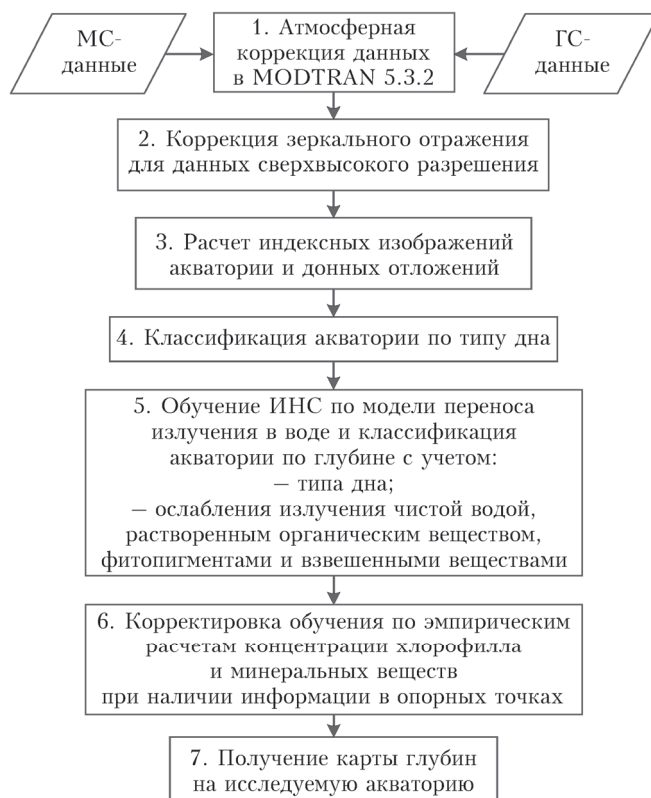


Рис. 1. Укрупненная схема алгоритма оценки глубин прибрежных участков моря по много- и гиперспектральным данным

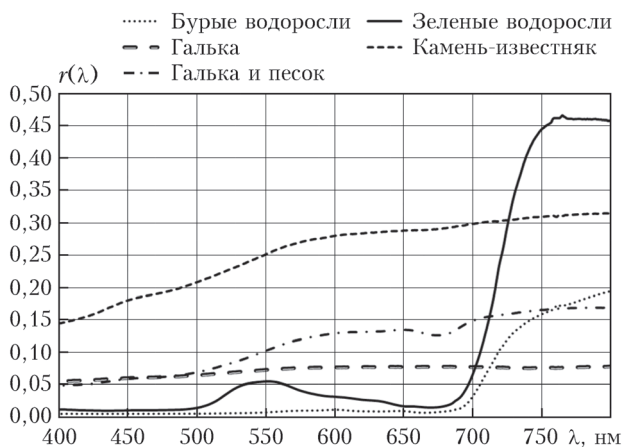


Рис. 2. Коэффициенты спектральной яркости различных типов дна (открытые грунты и заросшие водорослями), характерных для Черного моря

в качестве исходных данных алгоритма, а также спектральные характеристики прибрежных участков моря, имеющих глубины до 3 м. Для каждого участка проводилось от 5 до 10 измерений, при этом доверительный интервал измерений $r(\lambda)$ с надежностью 0,95 находился в пределах 0,001–0,025, увеличиваясь с длиной волны для водорослей.

Основные этапы обработки

Начальным этапом алгоритма оценки глубин является атмосферная коррекция данных аэрокосмической съемки, которая выполнялась с помощью программы моделирования переноса излучения в атмосфере MODTRAN 5.3.2.

Следующий этап обработки предусматривал донную классификацию, для реализации которой предложено использовать следующие индексы:

– для идентификации дна с открытым грунтом (песок, галька) – индекс $K_{\Gamma} = r_{570} - r_{480}$;

– для дна, покрытого водорослями, – значение длины волны, на которой градиент спектральной характеристики в пределах интервала 660...750 нм равен нулю. В этом интервале для спектральной сигнатуры донной растительности характерен локальный максимум значений яркости на длине волны около 710 (для бурых водорослей) и 720 нм (для зеленых водорослей).

Пороговые значения индексов были получены по значениям коэффициентов отражения водной толщи, рассчитанных с помощью радиационной модели переноса излучения в воде и верифицированных по экспериментальным данным. Было подтверждено, что предложенные индексы, несмотря на вариативность в зависимости от гидрооптических свойств воды, имеют достаточную для их сегментации разделимость на глубинах до 4–5 м (для больших глубин тип дна мало влияет на значения яркости водной толщи). Например, пороговые значения индекса K_{Γ} для гальки в исследуемом районе Севастопольской бухты составляют менее 0,015, для во-

дорослей – менее 0,034, для чистого песка (или известняка) находятся в диапазоне от 0,016 до 0,08. В этом случае важным был выбор правильной последовательности алгоритма классификации методом дерева решений, в котором на первом этапе выделяются участки водорослей и только на оставшейся части изображения обнаруживаются грунтовые типы дна. Все остальные участки моря, которые не удовлетворяют пороговым значениям индексов, относятся к районам глубокой воды (более 4–5 м).

После донной классификации осуществляется непосредственное определение глубин исследуемых участков моря. Использование модели переноса излучения в водной толще требует определения в качестве исходных данных параметров поглощения и рассеивания излучения в воде, обусловленных наличием в воде минеральных и органических примесей, которые могут быть неизвестны. В свою очередь, для решения обратной задачи и определения неизвестных параметров, включая глубину, авторами предлагается использовать методы многомерной оптимизации, основанные на преимуществе многомерности много- и гиперспектральных данных. К одному из таких методов относится алгоритм градиентного спуска, разновидность которого лежит в основе алгоритма обратного распространения ошибки при обучении ИНС [7].

В этом случае обучение сети осуществляется с использованием модели переноса излучения в водной толще [8]:

$$R_{dp}(\lambda) \left[1 - e^{-2f k_d(\lambda) H} \right] + R_b(\lambda) e^{-2f k_d(\lambda) H} = R_a(\lambda), \quad (1)$$

где $R_a(\lambda)$ – коэффициент спектральной яркости моря; $R_b(\lambda)$ – спектральная величина альbedo дна; $R_{dp}(\lambda)$ – спектральный коэффициент диффузного отражения водной толщи для бесконечно глубокого моря; $k_d(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{bp}(\lambda) + a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda)$ – спектральный показатель вертикального ослабления излучения (туда и обратно), m^{-1} ; $a_w(\lambda)$ и $b_w(\lambda)$ – известные показатели поглощения и обратного рассеяния назад чистой морской водой [5]; $a_{ph}(\lambda)$ – показатель поглощения растворенным органическим веществом и пигментами фитопланктона; $b_{bp}(\lambda)$ – показатель обратного рассеивания излучения взвесью; H – глубина, м; $f = 1,04 / \cos(Q)$ – показатель, зависящий от угла преломления солнечных лучей Q .

При этом спектральные величины показателей поглощения пигментами фитопланктона и обратного рассеивания взвесью выражаются через концентрацию хлорофилла [9] и удельный показатель поглощения на опорной длине волны [10]:

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) C^{1-B(\lambda)}, \quad (2)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(660) \left(\frac{660}{\lambda} \right)^{\xi}, \quad (3)$$

где C – концентрация хлорофилла, mg/m^3 ; $b_{bp}(660)$ – удельный показатель обратного рассеивания взвесью на длине волны около 660 нм; ξ – коэффициент

формы и размера частиц [11]; $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – эмпирические коэффициенты, определенные для каждого канала [9].

В процессе моделирования рассчитывается множество векторов значений $R(\lambda) = f(C, b_{bp}(660), H)$, так называемых пар входных и выходных данных, которые и используются для обучения ИНС.

Далее определение глубины моря осуществляется по весовым коэффициентам, полученным в процессе обучения сети методом обратного распространения ошибки. Весовые коэффициенты являются результатом аппроксимации физической модели распространения излучения в воде и итеративно корректируются в направлении конфигурации, которая позволяет сети различать представляющие интерес образы прототипа. На вход сети могут также подаваться и известные данные, полученные в результате эксперимента, тем самым корректируя весовые коэффициенты сети. Структурная схема предлагаемого метода представлена на рис. 3. В качестве данных входного слоя при обучении ИНС берутся вектора значений спектральной яркости водной поверхности в трех наиболее информативных диапазонах спектра $R(\lambda_1)$, $R(\lambda_2)$, $R(\lambda_3)$ из расчета одной спектральной полосы на узел. Анализ входных данных происходит в скрытом и выходном слоях нейронной сети. Результаты анализа содержатся в выходном слое, который представляет собой массив данных,

содержащий информацию о глубине H , удельном показателе обратного рассеивания взвешенными веществами и концентрации хлорофилла C .

Наиболее целесообразно для решения обратной задачи определения глубин использовать данные о яркости водной толщ, зарегистрированные в трех спектральных каналах, соответствующих фиолетовой (400–450 нм) или синей (450–520 нм), зеленой (510–580 нм) и желтой (580–620 нм) областям спектра, или в спектральных каналах с центрами в области длин волн 425 или 485, 545 и 605 нм. Это обосновывается тем, что в полосе спектра 400–450 нм и близкой к ней наблюдаются наименьшие показатели ослабления солнечного излучения в прозрачных водах, а значения яркости в последних двух спектральных каналах характеризуют уровень поглощения хлорофилла и концентрацию взвешенных веществ, определяющих величину обратного рассеивания.

На последнем этапе алгоритма может быть проведена корректировка результатов расчета глубин при наличии известных статистических зависимостей между значениями спектральной яркости и концентрацией хлорофилла или взвеси, выраженной через показатель обратного рассеивания излучения взвешенными веществами.

Определение концентрации C общего содержания хлорофилла a возможно осуществлять с помощью

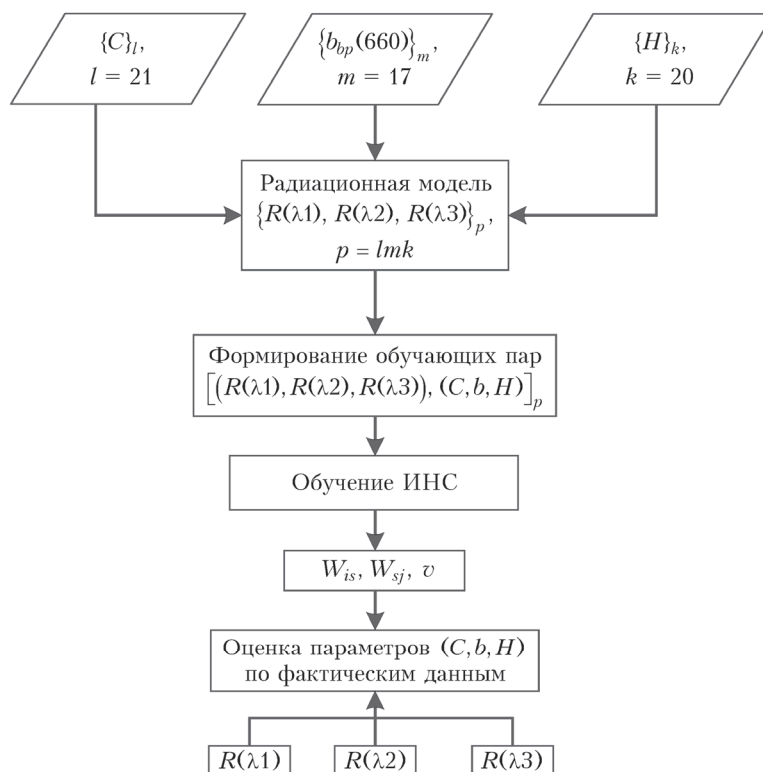


Рис. 3. Структурная схема использования метода ИНС для оценки глубин прибрежных участков моря (l , m и k – количество изменяемых значений C , $b_{bp}(660)$ и H соответственно; W_{is} – весовые коэффициенты между входным и скрытым слоем ИНС; W_{sj} – весовые коэффициенты между выходным и скрытым слоем ИНС; v – темп обучения ИНС)

известных биооптических индексов, например приведенных в работе [12]:

$$C = f\left(\mathbf{Z}, \lg \frac{R(485)}{R(560)}\right), \quad (4)$$

где \mathbf{Z} – вектор коэффициентов регрессионной зависимости между $\lg \frac{R(485)}{R(560)}$ и концентрацией хлорофилла C , полученной по измерениям *in situ*.

Для показателя обратного рассеивания взвешенными веществами может быть применен регрессионный алгоритм, построенный по данным натурным измерений с использованием средних значений коэффициента яркости на длине волны около 660 нм [13]:

$$b_{bp}(660) \approx 20a_w(660)R(660). \quad (5)$$

В свою очередь, зная удельный показатель обратного рассеивания, можно определить концентрацию взвешенных веществ $C_{ov} = Mb_{bp}(660) + N$, где M и N – коэффициенты линейной регрессии [14].

По результатам расчета этих показателей уточняются и корректируются значения глубины для каждого элемента разрешения много- и гиперспектральных снимков, т.е. обучение сети осуществляется по уменьшенному набору данных.

Результаты

Алгоритм восстановления глубин был верифицирован по данным ГС-съемки с КА «Ресурс-П», а достоверность донной классификации была оценена в ходе натурных исследований прибрежных участков Черного моря. На рис. 4 приведены результаты картирования глубин участка Черного моря в районе населенного пункта Кача (44°46'22" с.ш., 33°32'19" в.д.). Для оценки точности рассмотренного метода использовались батиметрические карты, опубликованные на сайте <http://navionics.ru> [15].

Всего для верификации было использовано около 60 точек, по которым построена линейная регрессия между рассчитанными и полученными по морским картам значениями глубин, определен коэффициент корреляции и среднеквадратическая ошибка измерений (RMSE). Сравнение результатов обработки ГС-данных и имеющихся морских карт показало их достаточно высокое совпадение – в мелководной части моря коэффициент корреляции составляет 0,9, для глубин до 7 м расхождения не превышают 1,5 м, при глубине более 7 м достигают 3 м. При этом наибольшие погрешности соответствовали участкам моря с высоким содержанием фитопланктона, поглощающего излучение.

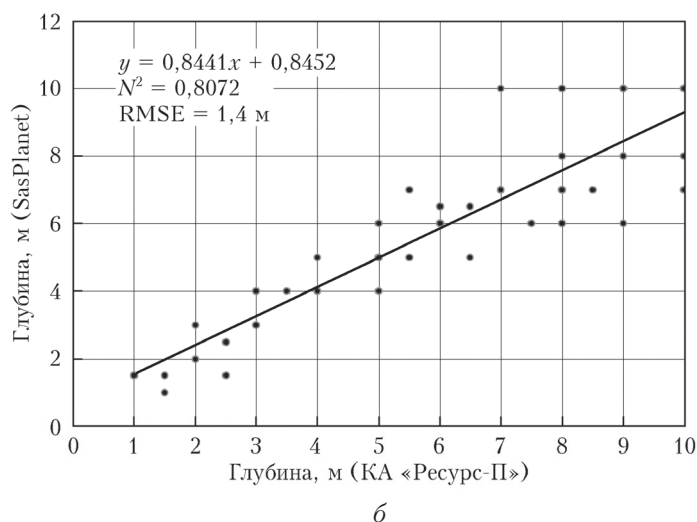
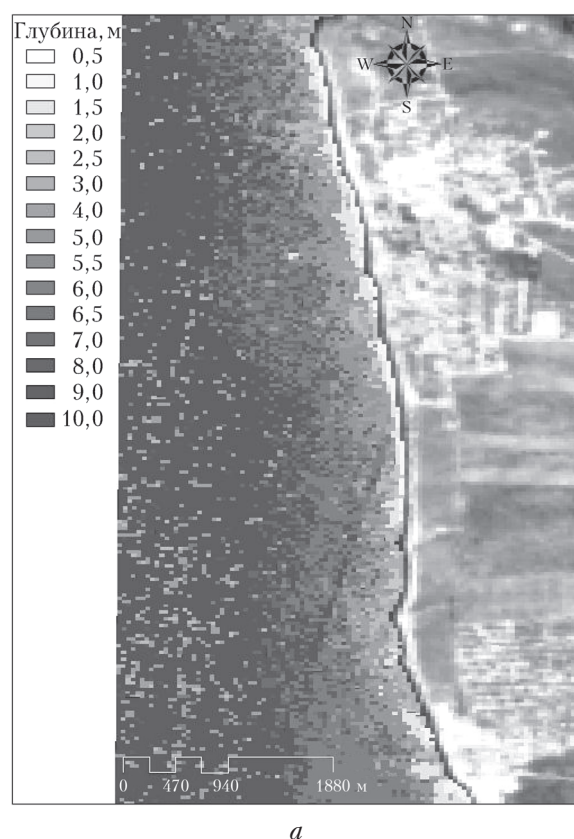


Рис. 4. Результат картирования глубин по ГС-изображениям КА «Ресурс-П» на участок Черного моря (район населенного пункта Кача) (а); зависимость между результатами расчета и данными о глубинах, указанных на батиметрических картах (б)

Для реализации метода оценки глубин разработано специализированное программное обеспечение тематической обработки много- и гиперспектральных данных [16]. Неотъемлемой частью программного обеспечения является библиотека спектральных характеристик различных типов дна и участков акватории, накопленная в процессе летно-экспериментальных и наземных спектрометрических работ.

Заключение

Постоянная актуализация глубин мелководной зоны морей является одной из важных задач гидробиологических исследований морей. Решение этой задачи возможно с помощью дистанционных данных в видимом диапазоне спектра, однако их использование может быть ограничено отсутствием информации о глубинах в опорных точках и о показателях ослабления света при прохождении через водную толщу. Нами предложен метод, позволяющий проводить восстановление глубин прибрежных участков моря даже без указанной информации. Определение глубины осуществляется за счет комплексного использования физической модели переноса излучения в водной среде, преимущества много- или гиперспектральности данных в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра и алгоритма искусственных нейронных сетей, предоставляющего возможность решать многопараметрические задачи нелинейной оптимизации. Положительным свойством ИНС является возможность обучения и выявления сложных зависимостей между входными и выходными данными с получением достоверного результата даже при неполной исходной информации.

Возможность использования такого подхода продемонстрирована на примере актуализации глубин прибрежных участков Черного моря по гиперспектральным данным высокого и низкого пространственного разрешения. Результаты батиметрических оценок хорошо согласуются с картами глубин, находящимися в свободном доступе, а также с результатами натурных замеров (средняя погрешность измерений составила 14%). Определение для каждого элемента разрешения аппаратуры глубины обеспечивалось:

- применением коэффициентов яркости водной толщи как минимум в трех спектральных каналах видимого диапазона спектра;

- введением этапа классификации дна, яркость которого вносит значительный вклад в коэффициент спектральной яркости воды на мелководье;

- учетом взаимодействия физических факторов, формирующих отражательные характеристики естественного излучения водной поверхностью в нескольких спектральных каналах много- и гиперспектральных данных за счет поглощения и рассеивания светового излучения в водной толще лимническими составляющими;

- использованием при обучении ИНС зависимостей между гидрооптическими показателями (содержание хлорофилла *a* и взвешенных веществ)

и значениями яркости восходящего от поверхности излучения для выбранных длин волн, полученных по результатам натурных наблюдений.

1. *Gordon H.R., McCluney W.R.* Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // *Appl. Opt.* 1975. V. 14, iss. 2. P. 413–416.
2. *Lyzenga D.R.* Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features // *Appl. Opt.* 1978. V. 17, iss. 3. P. 379–383.
3. *Stumpf R.P., Holderied K.* Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // *Limnol. Oceanogr.* 2003. V. 48, N 1. P. 547–556.
4. *Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии* / Пер. с англ.; под ред. А. Крэнелла. М.: Мир, 1984. 535 с.
5. *Оптика океана*. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 370 с.
6. *Адаменко В.Н., Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Чехин Л.В.* Радиационный режим и оптические свойства озер. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 300 с.
7. *Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В., Курьянович К.В., Скороходов А.В.* Статистическая модель текстурных признаков перистой облачности по спутниковым снимкам MODIS // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 7. С. 640–646.
8. *Lee Z., Carder K.L., Hawes S.K., Steward R.G., Peacock T.G., Davis C.O.* A model for interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance // *Appl. Opt.* 1994. V. 33, iss. 24. P. 5721–5732.
9. *Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *J. Geophys. Res. C.* 1995. V. 100, N 7. P. 13321–13332.
10. *Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H., Brown J.W., Smith R.C., Baker K.S., Clark D.K.* A semianalytic radiance model of ocean color // *J. Geophys. Res. D.* 1988. V. 93, N 9. P. 10909–10924.
11. *Carder K.L., Chen F.R., Lee Z.P., Hawes S.K., Kamykowski D.* Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures // *J. Geophys. Res. C.* 1999. V. 104, N 3. P. 5403–5422.
12. *Фефилов Ю.В.* Математическое и программное обеспечение информационной технологии дистанционного определения параметров первичной биопродуктивности // *Электронный журнал «Исследовано в России»*. 2003. С. 1907–1923. URL: <http://zhurnal.mipt.ru>
13. *Morel A., Gentili B.* Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects // *Appl. Opt.* 1993. V. 32, iss. 33. P. 6864–687.
14. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шерберстов 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. Т. 2, вып. 5. С. 117–127.
15. *Карторафия*. URL: <http://navionics.ru/katalog-kart/itemlist/category/33-navionics-gold-small-rossiya>
16. *Марков А.В., Григорьева О.В., Саидов А.Г., Жуков Д.В., Мочалов В.Ф.* Оценка экологического состояния акватории морского порта Санкт-Петербурга с помощью программного комплекса тематической обработки материалов аэрокосмической съемки // *Геоматика*. 2013. № 2. С. 16–20.

O.V. Grigorieva, D.V. Zhukov, A.V. Markov, V.F. Mochalov. **The assessment of the coastal water depths using multi- and hyperspectral remote sensing imagery.**

The method is considered for updating of the coastal water depths according to multi- and hyperspectral remote sensing imagery in the visible and near infrared spectral range. The depth recovery for each element of the image is produced on the basis of solving the inverse problem, which consists in training an artificial neural network using a semi-analytical model of radiation transfer in water taking into account the effects of scattering and absorption of light in the underwater light field at least in three informative spectral channels for each bottom type. At the same time, it is possible to adjust the learning process by means of regression algorithms for determination of organic and mineral impurities in water on their in-situ measurements. We enriched the library of the spectral characteristics of different types of bottom and found informative signs identifying them. The results are tested according to aviation and hyperspectral space imageries.