

Использование спутниковой информации для оценок качества воды и батиметрических характеристик Новосибирского водохранилища

Н. М. КОВАЛЕВСКАЯ^{1,*}, В. В. КИРИЛЛОВ¹, В. Е. ПАВЛОВ¹, А. Ш. ХАБИДОВ¹,
О. В. ЛОВЦКАЯ¹, Е. А. ФЕДОРОВА²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

²Южное отделение Института океанологии РАН, Геленджик, Россия

*Контактный e-mail: knm@iwep.ru

Изучена изменчивость параметров качества воды Новосибирского водохранилища на основе применения инверсионных алгоритмов для определения концентрации хлорофилла, взвешенного вещества и показателя поглощения растворенного органического вещества. В алгоритмах использовались данные о коэффициенте яркости водной поверхности, полученные спектрометром MERIS/ENVISAT.

С целью дальнейшего восстановления распределения хлорофилла в водной толще, большей, чем слой первой оптической глубины, решалась задача получения батиметрических оценок глубоководных участков. Для этого использовался метод отношений спектральных яркостей в различных каналах. Получены наиболее эффективные комбинации каналов спутника WorldView-2 для глубоководных участков водохранилища.

Ключевые слова: получение оценок качества воды, инверсионный нейросетевой алгоритм, MERIS/ENVISAT, батиметрическая оценка, мезотрофный водоем, WorldView-2.

Введение

Одно из наиболее быстро развивающихся направлений исследования Земли — дистанционное зондирование (ДЗ) водных объектов — приобретает все большее значение для проблем водной экологии и изменения климата.

Оптические свойства природных вод таковы, что электромагнитная радиация лишь в видимом диапазоне спектра способна существенно проникать вглубь водного столба [1]. Фотоны взаимодействуют с водной средой, и результирующая радиация оказывается перенаправленной назад к разделу вода — атмосфера. Обратный рассеянный световой поток несет информацию об оптических свойствах водного столба. Выходящий из воды свет является сверткой всех произошедших взаимодействий световых фотонов с водной средой: рассеяния молекулами воды, поглощения фитопланктоном и растворенным органическим веществом (РОВ), рассеяния и в существенно меньшей мере

поглощения взвешенным веществом (ВВ) [2]. Это естественным образом объясняет исключительную роль спутниковых датчиков, работающих в оптическом диапазоне при исследовании внутриводных параметров и процессов.

Первым звеном трофической цепи и основной характеристикой гидрозоля Новосибирского водохранилища является фитопланктон. Он образует особую составляющую гидровзвеси. Общеизвестный метод оценки биомассы и развития фитопланктона, а также продуктивности водоемов — определение концентрации хлорофилла (ХЛ), играющего важнейшую роль в процессе фотосинтеза. Информация о пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла служит важным индикатором качества воды.

Изменчивость параметров качества воды может быть изучена с помощью применения инверсионных методов к данным спектрометра MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) со спутника ENVISAT (Environmental Satellite), находившегося на орбите в 2002–2012 гг. и хорошо зарекомендовавшего себя с точки зрения надежности мониторинга морских акваторий и внутренних водоемов. Эти данные позволяют определить концентрации хлорофилла и взвешенного вещества наряду с показателем поглощения РОВ в слое первой оптической глубины [3].

Результаты инверсионного MERIS-моделирования показали, что среднее значение первой оптической глубины в июле составляет 25 % от средней глубины Новосибирского водохранилища. В условиях ветра получение надежной информации о параметрах качества воды в нижней части водохранилища связано с задачей восстановления распределения хлорофилла по всей глубине водной толщи, для решения которой необходимы батиметрические оценки. Поскольку методы активного зондирования, такие как замеры глубин с помощью эхолота или лидара, могут быть весьма дорогостоящими [4], а гидролокационное зондирование имеет низкое пространственное разрешение [5], пассивное дистанционное зондирование становится активно развивающейся альтернативой для получения оценок глубин. В частности, произошло снижение ошибки до величины менее 15 % даже в непрозрачных водах [6] после запуска спутника WorldView-2, имеющего высокое пространственное разрешение (1.84 м) и дополнительные спектральные каналы, в том числе фиолетовый *Coastal* (400–450 нм), в котором излучение наиболее глубоко проникает в водную толщу.

При использовании мультиспектральных изображений наиболее эффективен подход, основанный на модели отношения спектральных яркостей [7], поскольку резуль- тативные оценки учитывают пространственную неоднородность параметров качества воды и не зависят от типа донной поверхности. Предыдущие исследования эффективности глубин на основе данных WorldViewV-2 применялись для морских глубоководных и прибрежных участков олиготрофного типа [8–11], для мелководных участков с большим количеством взвеси [12, 13], а также для мелких эвтрофных озер [14].

В настоящей работе используется моделирование комбинаций спектральных каналов для получения батиметрических оценок глубоководного мезотрофного водоема с целью дальнейшего развития современных технологий получения параметров качества воды.

1. Восстановление параметров качества воды

В зависимости от соотношения концентраций трех компонентов (хлорофилла, ВВ, РОВ) в водной среде определяются оптические свойства акваторий. Воды Мирового океана делятся на две категории. Воды первого типа — это открытые океанические воды, где

высокая концентрация хлорофилла преобладает над остальными компонентами. Все внутренние воды определяются как воды второго типа, где все три компонента могут вносить значительный вклад в оптические свойства акватории.

Для определения оптически активных компонентов водной среды используются два вида биооптических алгоритмов — эмпирические и полуаналитические.

Эмпирические алгоритмы основаны на использовании рассчитанных по данным натурных измерений статистических (регрессионных) соотношений между определяемым параметром (концентрацией хлорофилла, концентрацией взвешенного вещества или показателем поглощения РОВ). Используются отношения яркостей для выбранных длин волн. Итоговые соотношения зависят от количественного и качественного состава оптически активных компонентов водной среды, который может сильно варьировать. В частности, концентрация хлорофилла может быть вычислена по данным спутниковых радиометров через регрессионное соотношение яркостей на каналах максимума и минимума поглощения.

Однако для вод второго типа, где концентрация хлорофилла является не единственным фактором, определяющим оптические свойства, стандартные эмпирические алгоритмы нуждаются в существенной коррекции. Поэтому для акватории Новосибирского водохранилища использовались алгоритмы, способные одновременно восстанавливать все упомянутые выше параметры качества воды [15–17].

Полуаналитические алгоритмы предназначены для определения концентраций хлорофилла и взвешенного вещества, а также показателя поглощения РОВ по данным о коэффициенте яркости водной поверхности [18]. Алгоритмы основаны на соотношении величины коэффициента яркости $\rho_w(\lambda)$, показателей поглощения $a(\lambda)$ и обратного рассеяния $bb(\lambda)$ воды. Поскольку первичные оптические характеристики водной среды обладают свойством аддитивности, показатели $a(\lambda)$ и $bb(\lambda)$ представляются в виде суперпозиции вкладов оптически активных параметров водной толщи:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{cdom}(\lambda), \quad (1)$$

$$bb(\lambda) = bb_w(\lambda) + bb_{tsm}(\lambda), \quad (2)$$

где $a_w(\lambda)$ и $bb_w(\lambda)$ — известные показатели поглощения и обратного рассеяния водой без примесей [19]. Неизвестные — показатель поглощения пигментами фитопланктона $a_{ph}(\lambda)$, показатель поглощения РОВ $a_{cdom}(\lambda)$ и показатель обратного рассеяния ВВ $bb_{tsm}(\lambda)$ — соответственно представляются через концентрацию хлорофилла Con_{chl-a} , показатель поглощения РОВ $a_{cdom}(443)$ и концентрацию взвешенного вещества Con_{tsm} , вычисленные на длине волны $\lambda = 443$ нм [20].

Таким образом должна решаться обратная задача определения трех неизвестных параметров Con_{chl-a} , Con_{tsm} и $a_{cdom}(443)$. В исследовании использованы результаты применения двух подходов: нейросетевого (NN) [21] и квазианалитического (QAA) [22].

Наиболее оперативным для решения обратной задачи получения параметров качества воды является NN-алгоритм: он позволяет обрабатывать снимки в почти реальном масштабе времени. Из существующих типов искусственных нейронных сетей наиболее частое применение для целей дистанционного зондирования нашли многослойные перцептроны. В общем случае многослойный перцептрон состоит из входного, внутреннего и выходного слоев. Входной слой содержит нейроны, отражающие свойство входных параметров, т. е. спектральных значений яркостных сигналов, исходящих

от поверхности воды. Выходной слой содержит нейроны, число которых соответствует числу искомым параметров (хлорофилла, ВВ, РОВ). Каждый нейрон внутреннего слоя связывается со всеми нейронами входного и выходного слоев посредством придания передаточной функции индивидуальных весовых коэффициентов (весов). Веса корректируются в предварительном процессе обучения с использованием фактических значений яркостных сигналов, соответствующих концентраций хлорофилла и взвешенного вещества, а также показателя поглощения РОВ для водоемов с различным уровнем трофности.

2. Результаты получения оценок качества воды на основе данных MERIS/ENVISAT

По результатам NN-моделирования и анализа многолетних контактных данных обнаружена пространственная неоднородность распределения концентрации хлорофилла по акватории водохранилища, отражающая морфометрические и гидрологические особенности различных его участков и соответствующая разделению водохранилища на области, в том числе по особенностям процессов морфолитогенеза [23].

На рис. 1 представлены сезонные и годовые изменения пространственных распределений концентрации хлорофилла в 2007–2011 гг., полученные на основе использования нейросетевого MERIS-моделирования. Данный подход позволяет получить обширный и систематизированный материал на основе выделения подобластей однородности, которые оказались совпадающими для всех трех параметров качества воды. В частности, для июля 2011 г. выделяются пять подобластей, в каждой из которых значения параметров качества воды образуют некий кластер в трехмерном (хлорофилл, ВВ, РОВ) признаковом пространстве. На рис. 2 представлены подобласти-кластеры, полученные по MERIS-данным от 08.07.2011:

- в области флювиального морфогенеза R1(Pin1-Pin10), R2(Pin10-Pin26), R3(Pin26-Pin69);
- в переходной области R4(Pin69-Pin76);
- в области волнового морфогенеза R5(Pin76-Pin90).

Сопоставление концентраций хлорофилла с показателями поглощения пигментами фитопланктона показало, что при NN-подходе получены лучшие результаты для вычисления концентрации хлорофилла по сравнению с QAA-подходом независимо от выбранной подобласти (рис. 3, а).

Кластер R2 характеризуется самой высокой зависимостью полного поглощения от концентрации хлорофилла (рис. 3, б). В соответствии с выражением (1) эта подобласть испытывает самое низкое влияние РОВ. В кластерах R1 – R4 полное рассеяние определяется только обратным рассеянием взвешенного вещества (рис. 3, в) или в соответствии с (2) только концентрацией ВВ. В кластерах R1, R3, R4 уровень мутности полностью определяется концентрацией ВВ (рис. 3, г).

В применяемом NN-подходе использовалось значение первой оптической глубины Z_{90} , из которой исходит 90 % отраженного света [24]. Результаты MERIS-моделирования показали, что, в частности, в июле 2011 г. на большей части Новосибирского водохранилища $Z_{90} < 2$ м при средней глубине водохранилища 9 м и максимальной — 25 м при НПУ (рис. 4) [25].

Анализ спутниковых данных за различные по водности годы позволил оценить значимость для уровня развития фитопланктона изменений водообеспеченности водохра-

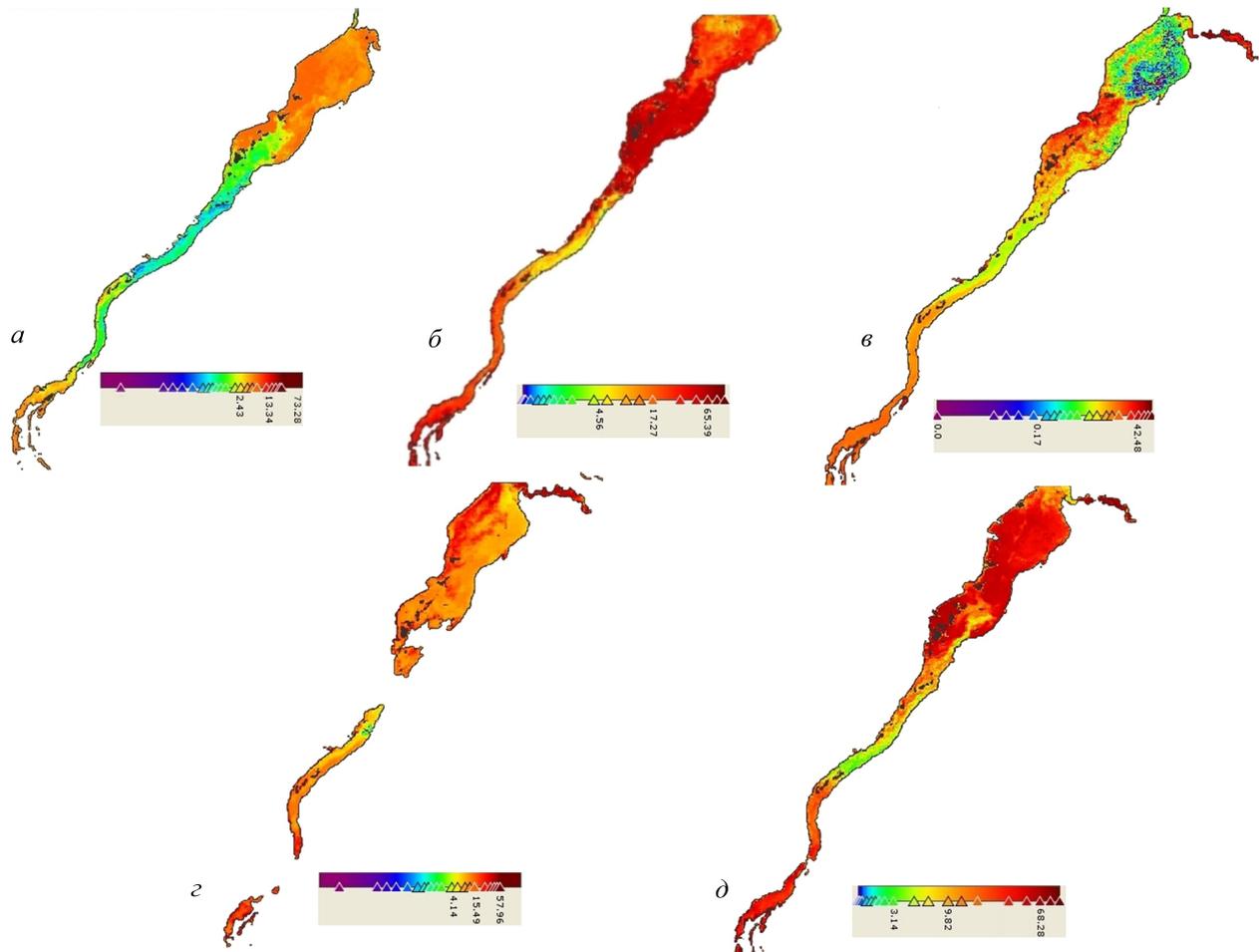


Рис. 1. Пространственное распределение концентраций хлорофилла в разные сезоны 2007–2011 гг., $\text{мг}/\text{м}^3$: а — июль 2007 г., б — июль 2008 г., в — октябрь 2009 г., г — июнь 2010 г., д — июль 2011 г.

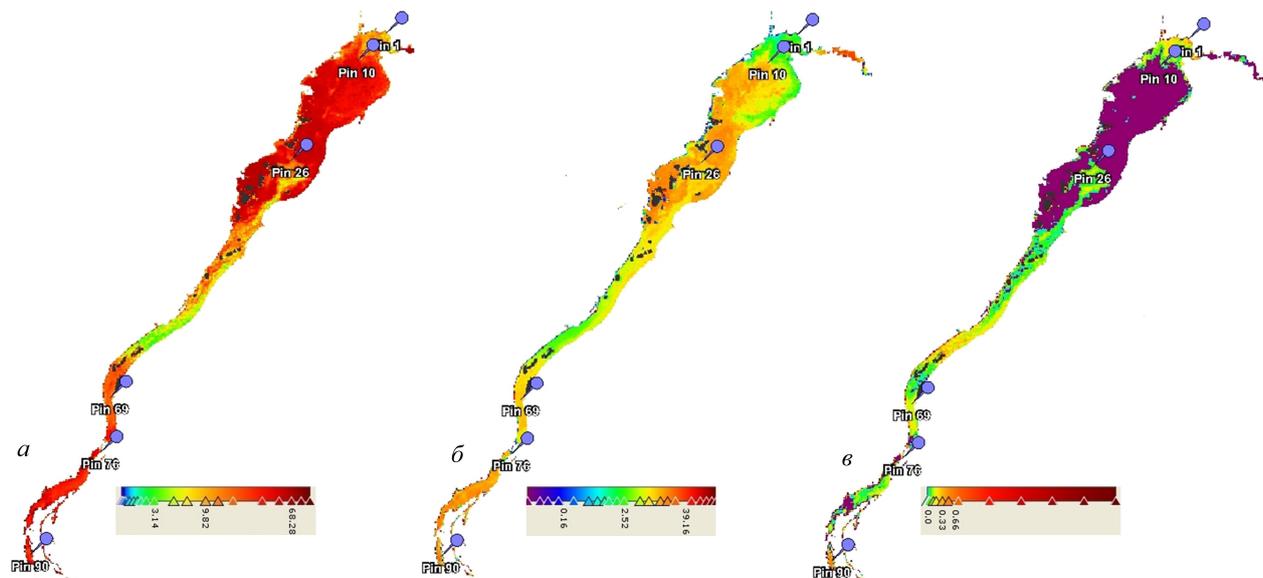


Рис. 2. Пространственные распределения (08.07.2011): а — концентрация ХЛ, $\text{мг}/\text{м}^3$, б — концентрация ВВ, $\text{г}/\text{м}^3$, в — показатель поглощения РОВ, м^{-1}

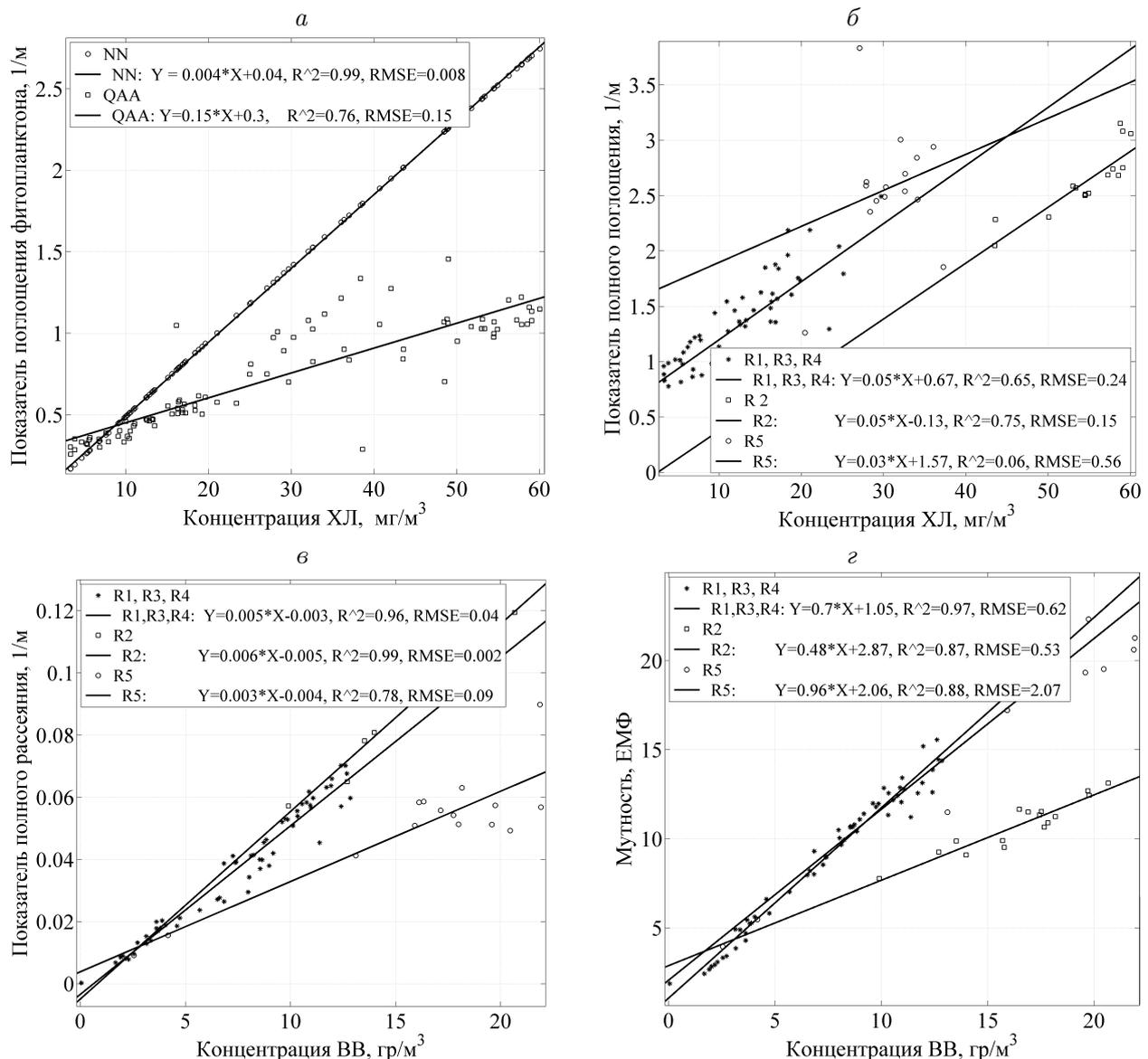


Рис. 3. Соотношения гидрооптических характеристик и MERIS-параметров качества воды (08.07.2011): *а* — зависимость показателя поглощения пигментами фитопланктона от концентрации ХЛ; *б* — зависимость показателя полного поглощения от концентрации ХЛ; *в* — зависимость показателя полного рассеяния от концентрации ВВ; *г* — зависимость мутности от концентрации ВВ

нилица, определяющей проточность водоема в целом и его отдельных участков. Поля концентрации хлорофилла изменяются (в сезонном и многолетнем аспектах) в связи с изменением морфометрии, т. е. глубины и объемов воды, и гидрологических характеристик — объемов водных масс, скорости течения и интенсивности водообмена.

При ветровом воздействии происходит изменение полей концентрации хлорофилла по вертикали, что наиболее выражено на нижнем, наиболее широком и глубоком, участке водохранилища. Поэтому для его нижней части встает особая задача восстановления распределения концентрации хлорофилла во всей водной толще по полученным данным о его концентрации в слое первой оптической глубины [26, 27]. Для решения этой задачи необходимы батиметрические данные высокого разрешения.

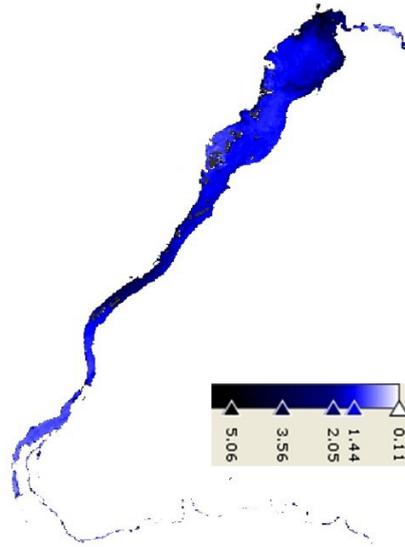


Рис. 4. Пространственное распределение первой оптической глубины Z_{90} (08.07.2011), м

Таким образом, получение приемлемой и надежной информации о качестве воды в нижней части Новосибирского водохранилища связано с задачей оценок глубин, которая также может решаться на основе данных оптического диапазона.

3. Оценки глубин отдельных участков водохранилища

Световой поток при не слишком больших оптических толщах рассеяния водного столба экспоненциально убывает с глубиной, что выражается законом Бугера — Ламберта — Бера

$$L(Z) = L(0) \exp(-kZ). \quad (3)$$

Здесь $L(Z)$ — световой поток, пропущенный слоем воды; $L(0)$ — входящий световой поток; Z — глубина, через которую проходит световой поток; k — коэффициент диффузного ослабления.

Таким образом, при анализе поведения света в водной толще необходимо принимать во внимание экспоненциальное уменьшение яркости с глубиной. Соотношение (3) используется в двух видах батиметрических оценок: в линейных оценках [28] и оценках на основе отношений спектральных яркостей [9]. Основным недостатком линейной модели является неспособность учитывать различия спектральных характеристик для неоднородных участков с различными гидробиологическими и гидрооптическими характеристиками. Поэтому для оценок глубин водохранилища использована модель отношения спектральных яркостей в каналах данных WorldView-2.

Поглощение света на всех глубинах водоема означает, что наблюдаемая яркость R_w принимает минимальные значения в самых глубоких слоях воды независимо от типа дна. На основе этого факта в работе [9] показано, что логарифм яркости в канале с более высоким поглощением $\ln(R_w(\lambda_{HI}))$ будет уменьшаться по отношению к логарифму яркости в канале с более низким поглощением $\ln(R_w(\lambda_{LO}))$ пропорционально глубине. Соответственно, отношение яркостей в каналах будет увеличиваться с увеличением глубины [9]:

Т а б л и ц а 1. Новые спектральные каналы WorldView-2: *Coastal*, *Yellow*, *Red edge*, *NIR1*, *NIR2*

Канал	Спектральный диапазон, нм
<i>Coastal</i>	400–450
<i>Blue</i>	450–510
<i>Green</i>	510–580
<i>Yellow</i>	585–625
<i>Red</i>	630–690
<i>Red edge</i>	705–745
<i>NIR1</i>	770–895
<i>NIR2</i>	860–1040

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_{LO}))}{\ln(nR_w(\lambda_{HI}))} - m_0, \quad (4)$$

где λ_{LO} — канал с низким поглощением; λ_{HI} — канал с высоким поглощением; m_1 — настраиваемая постоянная; m_0 — смещение для глубины $Z = 0$; n — фиксированная для всех областей постоянная, обеспечивающая положительные значения логарифмических и линейной функций.

Модель (4) может быть использована для одновременной оценки уровней глубоководных и мелководных участков [10]. Хотя ранее модель (4) использовалась только для двух пар традиционных каналов

$$\{\lambda_{LO}^{deep}, \lambda_{HI}^{deep}, \lambda_{LO}^{shallow}, \lambda_{HI}^{shallow}\} = \{Blue, Green, Red, NIR\},$$

данные дополнительных каналов

$$\{Coastal, Yellow, Red\ edge, NIR1, NIR2\}$$

позволяют получать более эффективные оценки глубин (табл. 1).

4. Результаты получения батиметрических оценок на основе данных WorldView-2

Поскольку свет в красном и ближнем инфракрасном диапазонах наиболее сильно поглощается водой, набор каналов *NIR2*, *NIR1*, *Red edge*, *Red* является определяющим для оценки глубин в мелководных участках. Так как излучение в фиолетовом, синем и зеленом диапазонах более всего проникает в водную толщу, то каналы *Coastal*, *Blue*, *Green* являются основными для батиметрических оценок глубоководных участков. Канал *Yellow* находится между сине-фиолетовым и красным диапазонами. Эффективность его использования зависит в большей степени от гидробиологических характеристик текущего состояния водоема.

Наличие дополнительных спектральных каналов WorldView-2 позволяет использовать в (4) новые виды комбинаций $\{\lambda_{LO}^{deep}, \lambda_{HI}^{deep}, \lambda_{LO}^{shallow}, \lambda_{HI}^{shallow}\}$ (табл. 2).

Канал *Yellow* является информативным в основном для определения высоких концентраций ВВ [12, 20]. Поскольку в нижней части водохранилища основная характеристика гидрозоля в штилевую погоду — это хлорофилл, в вычислительных экспери-

ментах значения яркостей в желтом диапазоне расхились со значениями яркостей сине-фиолетовой области спектра. Поэтому в исследовании возможностей батиметрических оценок нижней части водохранилища использовались комбинации без участия желтого канала (табл. 2).

Сравнительные оценки с данными эхолота (табл. 3, рис. 5) и сравнение с картой глубин (рис. 6) продемонстрировали, что наиболее качественное отображение уровней глубин представляют оценки на основе комбинации 1

$$\{\lambda_{LO}^{deep}, \lambda_{HI}^{deep}, \lambda_{LO}^{shallow}, \lambda_{HI}^{shallow}\} = \{Coastal, Green, Red, NIR1\}$$

и комбинации 9

$$\{\lambda_{LO}^{deep}, \lambda_{HI}^{deep}, \lambda_{LO}^{shallow}, \lambda_{HI}^{shallow}\} = \{Coastal, Green, Red, NIR2\}.$$

Т а б л и ц а 2. Используемые в (4) комбинации каналов WorldView-2: 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14

Комбинация	λ_{LO}^{deep}	λ_{HI}^{deep}	$\lambda_{LO}^{shallow}$	$\lambda_{HI}^{shallow}$
1	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>
2	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>
3	<i>Coastal</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>
4	<i>Blue</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>
5	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>
6	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>
7	<i>Coastal</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>
8	<i>Blue</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>
9	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>
10	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>
11	<i>Coastal</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>
12	<i>Blue</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>
13	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>
14	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>
15	<i>Coastal</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>
16	<i>Blue</i>	<i>Yellow</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>

Т а б л и ц а 3. Результаты сравнения оценок глубин с данными эхолота: коэффициенты детерминации (R^2) и среднеквадратичные ошибки ($RMSE$)

Комбинация	λ_{LO}^{deep}	λ_{HI}^{deep}	$\lambda_{LO}^{shallow}$	$\lambda_{HI}^{shallow}$	Максимальная глубина, м	R^2	$RMSE$, м
1	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>	18	0.62	1.4
2	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR1</i>	12	0.62	1.9
5	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>	13	0.35	2.2
6	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR1</i>	10	0.07	2.7
9	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>	13	0.62	1.8
10	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red</i>	<i>NIR2</i>	13	0.56	2.0
13	<i>Coastal</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>	10	0.31	2.3
14	<i>Blue</i>	<i>Green</i>	<i>Red edge</i>	<i>NIR2</i>	10	0.60	2.9

На соответствующих результатах четко прослеживается глубоководная полоса вдоль правого берега (рис. 6). Также верно представлена область с небольшими глубинами в районе острова Шумской Кордон и вокруг малых островов. Среднеквадратичные ошибки батиметрических оценок составляют 1.4 и 1.8 м соответственно для комбинаций 1 и 9 (табл. 3).

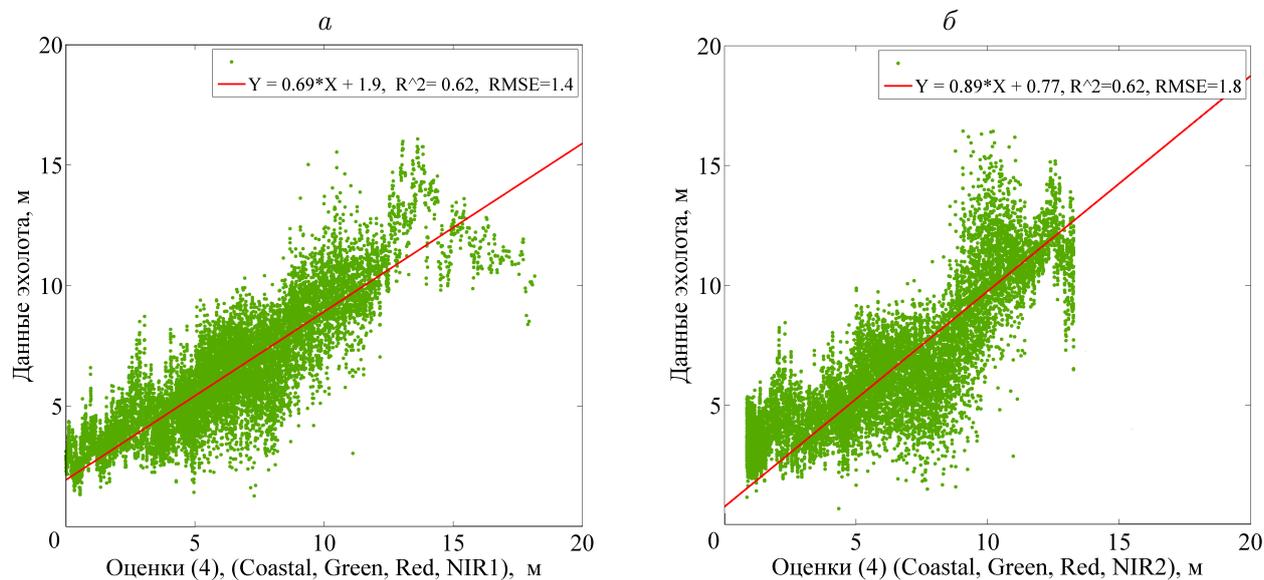


Рис. 5. Результаты оценок глубин (4) на основе WorldView-2 (27.08.2010) в сравнении с данными эхолота (2009): *а* — комбинация 1; *б* — комбинация 9

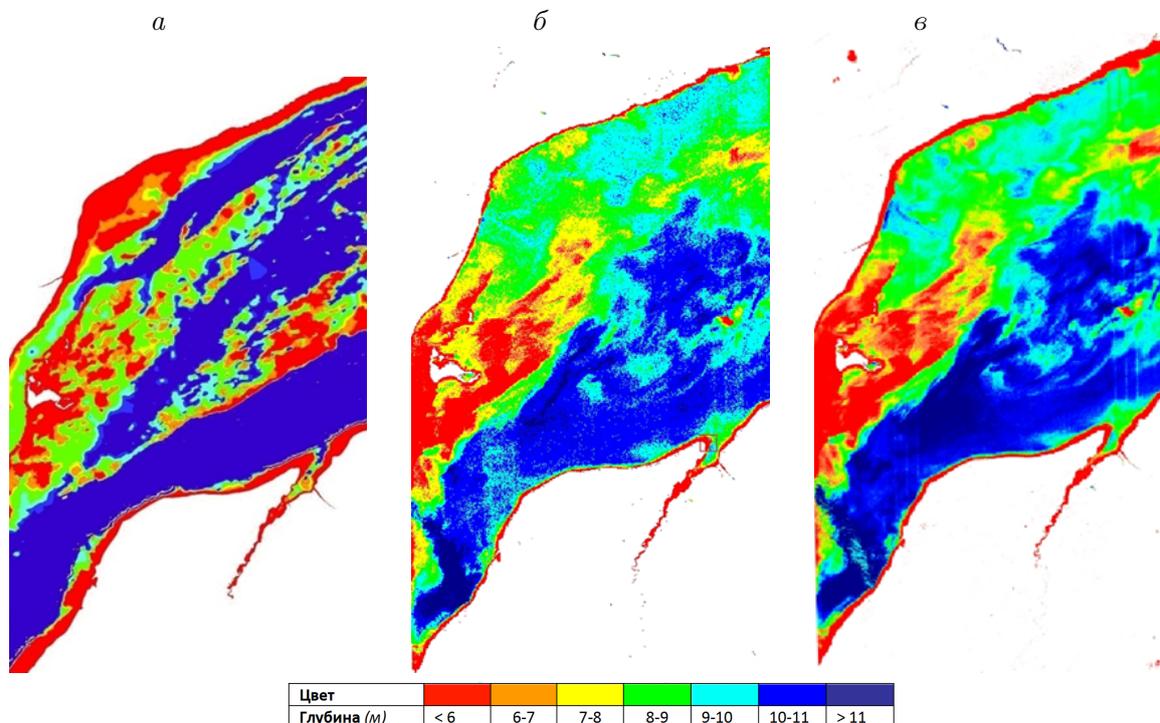


Рис. 6. Результаты оценок глубин (4) на основе данных WorldView-2 (27.08.2010) в сравнении с картой: *а* — карта глубин (2011); *б* — результат использования комбинации 1; *в* — результат использования комбинации 9

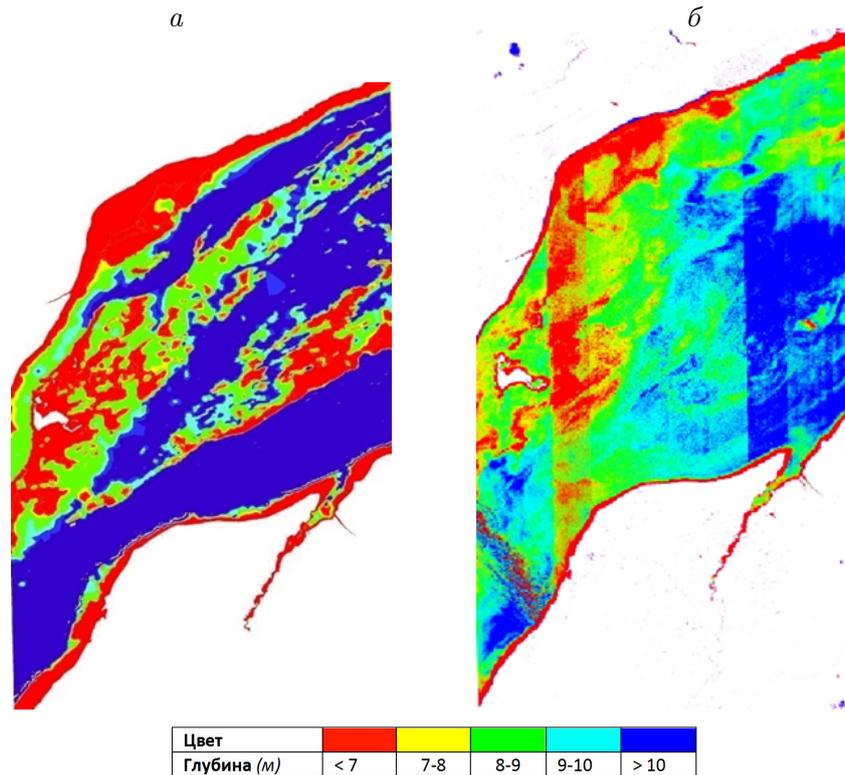


Рис. 7. Результаты оценок глубин (4) на основе данных WorldView-2 (27.08.2010) в сравнении с картой: *a* — карта глубин (2011); *б* — результат использования комбинации 5

Для комбинации 5

$$\{\lambda_{LO}^{deep}, \lambda_{HI}^{deep}, \lambda_{LO}^{shallow}, \lambda_{HI}^{shallow}\} = \{Coastal, Green, Red\ edge, NIR1\}$$

характерно хорошее совпадение с картой по малым глубинам в узкой прибрежной полосе вдоль левого берега водохранилища (рис. 7). Среднеквадратичная ошибка батиметрических оценок при использовании этой комбинации составляет 2.2 м (табл. 3). Непредставленным оказался мелководный участок, который относится к области с повышенными концентрациями хлорофилла и взвешенного вещества из-за высокой размываемости берега.

Заключение

На основе использования нейросетевого MERIS-моделирования получен обширный и систематизированный материал для изучения динамики параметров качества воды Новосибирского водохранилища. В слое первой оптической глубины водохранилища обнаруживаются подобласти, где имеются однородности, соответствующие особенностям процессов морфолитогеоза и обусловленные специфическими свойствами хлорофилла, взвешенного вещества, РОВ, а также первичных гидрооптических характеристик водохранилища.

С целью восстановления распределения параметров качества воды по всей глубине водной толщи исследованы возможности получения батиметрических характеристик водохранилища на основе сравнения яркостей по снимкам с высоким пространственным и спектральным разрешением, съемка производилась космическим аппаратом

WorldView-2. Несмотря на сложность батиметрических исследований в условиях мезотрофного водоема, найдены оптимальные наборы каналов WorldView-2 для получения предварительных оценок в глубоководных участках Новосибирского водохранилища.

Все определения искомым параметрам в настоящей работе базируются на условии выполнимости закона Бугера—Ламберта—Бера, который описывает распространение узконаправленного пучка света в оптически тонкой среде. Для сильно мутных сред с большими значениями оптических толщ рассеяния распространение излучения описывается интегродифференциальным уравнением переноса. Использование результатов его решения обеспечивает возможность уточнения данных вычислений яркости на больших глубинах, что и намечено на ближайшее будущее.

Совместное применение описанных технологий позволит более эффективно использовать данные спутниковой группировки Sentinel, у которой второй спутник позволяет получать оптические данные высокого спектрального и пространственного разрешения (Sentinel-2, 2015), а третий спутник является наследником MERIS/ENVISAT (Sentinel-3, 2016).

Благодарности. Авторы благодарят DigitalGlobe за снимки WorldView-2, полученные по программе The DigitalGlobe 8-Band Research Challenge.

Список литературы / References

- [1] **Bukata, R.P., Jerome, J.H., Kondratyev, K.Ya., Pozdnyakov, D.V.** Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995. 362 p.
- [2] **Sathyendranath, S.** Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. IOCCG Report Number 3. Dartmouth, Canada: MacNab Print, 2000. 140 p.
- [3] **Gordon, H.R., McCunley, W.R.** Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Applied Optics. 1975. Vol. 14(2). P. 413–416.
- [4] **Minghelli-Roman, A., Goreac, A., Mathieu, S., Spigai, M., Gouton, P.** Comparison of bathymetric estimation using different satellite images in coastal sea waters // Intern. J. of Remote Sensing. 2009. Vol. 30(1-2). P. 5737–5750.
- [5] **Kanno, A., Koibuchi, Y., Isobe, M.** Statistical combination of spatial interpolation and multispectral remote sensing for shallow water bathymetry // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. Vol. 8(1). P. 64–67.
- [6] **Nedham, H., Dhabi, A., Hartman, K., Mimpriss, G.** Peering Beneath the Surface. Available at: <http://ejournal.com/print/articles/peering-beneath-the-surface#sthash.YS3wlKrJ.dpuf> (accessed 20.10.2015).
- [7] **Stumpf, R.P., Holderied, K.** Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnology and Oceanography. 2003. Vol. 48(1). P. 547–556.
- [8] **Deidda, M., Sanna, G.** Bathymetric extraction using WorldView-2 high resolution images // Intern. Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIX-B8. Proc. of the XXII ISPRS Congress. Melbourne, Australia, 2012. P. 153–157. Doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-153-2012.
- [9] **Collin, A., Hench, J.L.** Towards deeper measurements of tropical reefscape structure using the WorldView-2 spaceborne sensor // Remote Sensing. 2012. Vol 4(12). P. 1425–1447.
- [10] **Uma Maheswari, R.** Mapping the under water habitat related to their bathymetry using WorldView-2 (wv-2) Coastal, Yellow, Rededge, Nir-2 satellite imagery in gulf of mannar to conserve the marine resource // Intern. J. of Marine Science. 2013. Vol. 3(11). P. 91–97.

- [11] **Jawak, S.D., Luis, A.J.** Spectral information analysis for the semiautomatic derivation of shallow lake bathymetry using high-resolution multispectral imagery: A Case Study of Antarctic Coastal Oasis // Intern. Conf. on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE 2015). Aquatic Procedia. 2015. Vol. 4. P. 1331–1338.
- [12] **Bramante, J., Raju, F., Kumaran Durairaju, Sin Tsai Min.** Multispectral derivation of bathymetry in Singapore's shallow, turbid waters // Intern. J. of Remote Sensing. 2013. Vol. 34(6). P. 2070–2088.
- [13] **Kaimaris, D., Patias, P., Stylianidis, E.** Evaluation of methodologies for the determination of bathymetry using WorldView-2 imagery: a case study at lake pramoritsa, greece // Applied Remote Sensing J. 2012. Vol. 2(2). P. 57–64.
- [14] **Yuzugullu, O., Aksoy, A.** Generation of the bathymetry of a eutrophic shallow lake using WorldView-2 imagery // J. of Hydroinformatics. 2014. Vol. 16(1). P. 50–59.
- [15] **Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Кириллова Т.В., Ловцкая О.В.** Сравнительные оценки качества воды в Новосибирском водохранилище на основе лимнологических MERIS-моделей и данных высокого разрешения WorldView-2 // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9(1). С. 176–186.
Kovalevskaya, N.M., Kirillov, V.V., Kirillova, T.V., Lovtskaya, O.V. Comparative assessment of water quality in the Novosibirsk Reservoir based on limnological MERIS data-models and high-resolution WorldView-2 // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2012. Vol. 9(1). P. 176–186. (In Russ.)
- [16] **Буканова Т.В.** Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград: АО ИО РАН, 2014. 142 с.
Bukanova, T.V. Trends of eutrophication of the Baltic Sea south-eastern part by satellite data: Dis. ... cand. of geogr. sci. Kaliningrad: AB SIO RAS, 2014. 142 p. (In Russ.)
- [17] **Ковалевская Н.М., Кириллов В.В.** Анализ пространственного распределения и сезонной динамики фитопланктона с использованием спутниковых данных // Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / Под ред. О.Ф. Васильева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. С. 125–131.
Kovalevskaya, N.M., Kirillov, V.V. Analysis of spatial distribution and seasonal dynamics of phytoplankton using satellite data // Long-term dynamics of water and ecological regime of Novosibirsk Reservoir / Ed. O.F. Vasiliev. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2014. P. 125–131. (In Russ.)
- [18] **Maritorena S., Siegel D.A., Peterson A.** Optimization of a semi-analytical ocean color model for global scale applications // Applied Optics. 2002. No. 41(15). P. 2705–2714.
- [19] **Gordon, H.R., Brown, O.B., Ewans, R.H., Brown, J.W., Smith, R.C., Baker, K.S., Clark, D.K.** A semianalytical radiance model of ocean color // J. of Geophysical Research. 1988. Vol. 93. P. 10909–10924.
- [20] **Кронберг П.** Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии / Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
Kronberg, P. Fernerkundung der erde grundlagen und methoden des remote sensing in der geologie ferdinand. Stuttgart: Enke Verlag, 1985. 394 p.
- [21] **Schiller, H., Doerffer, R.** Neural network for emulation of an inverse model — operational derivation of case II water properties from MERIS data // Intern. J. Remote Sensing. 1999. Vol. 20(9). P. 1735–1746.
- [22] **Lee, Z., Carder, K.L., Arnone, R.A.** Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // Applied Optics. 2002. Vol. 41(27). P. 5755–5772.

- [23] Управление состоянием берегов водохранилищ / А.Ш. Хабидов, И.О. Леонт'ев, К.В. Марусин, В.А. Шлычков, В.М. Савкин, В.С. Кусковский. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
Shore management of reservoirs / A.Sh. Khabidov, I.O. Leont'yev, K.V. Marusin, V.A. Shlychikov, V.M. Savkin, V.S. Kuskovskiy. Novosibirsk: Publ. House SB RAS, 2009. 239 p. (In Russ.)
- [24] **Kallio, K., Koponen, S., Ruiz-Verdu, A., Heege, T., Sorensen, K., Pyhalahti, T., Doerffer, R.** Project title: Development of MERIS lake water algorithms. Document title: Validation protocol (WP 2.4). Version: 1.0. http://www.brockmann-consult.de/beam-wiki/download/attachments/8355860/MERIS_Lakes_Validation_Protocol_V1.0.pdf (accessed 20.10.2015).
- [25] **Федорова Е.А., Марусин К.В., Хабидов А.Ш.** Изменение морфометрических характеристик Новосибирского водохранилища за 50-летний период эксплуатации. Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты // Тр. VI Шукинских чтений. М.: Географ. ф-т МГУ, 2010. С. 375–376.
Fedorova, E.A., Marusin, K.V., Khabidov, A.Sh. Morphometric characteristics of Novosibirsk Reservoir and their variations during 50-year period. Geomorphological processes and their applied aspects // Tr. VI Shchukinskikh Chteniy. Moscow: MSU Faculty of Geography, 2010. P. 375–376. (In Russ.)
- [26] **Ryabov, A., Rudolf, L., Blasius, B.** Vertical distribution and composition of phytoplankton under the influence of an upper mixed layer // J. of Theoretical Biology. 2010. Vol. 263(1). P. 120–133.
- [27] **Абакумов А.И., Израильский Ю.Г.** Модельный способ оценки содержания хлорофилла в море на основании спутниковой информации // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5(3). С. 473–482.
Abakumov, A.I., Izrailsky, Y.G. Model method for reconstruction of vertical chlorophyll concentration using satellite data // Computer Research and Modeling. 2013. Vol. 5(3). P. 473–482. (In Russ.)
- [28] **Lyzenga, D.R.** Shallow-water bathymetry using combined LIDAR and passive multispectral scanner data // Intern. J. of Remote Sensing. 1985. Vol. 6(1). P. 115–125.

*Поступила в редакцию 5 ноября 2015 г.,
с доработки — 22 декабря 2015 г.*

Use of satellite data for water quality parameters retrieval and bathymetry derivation for Novosibirsk Reservoir

KOVALEVSKAYA, NELLEY M.^{1,*}, KIRILLOV, VLADIMIR V.¹, PAVLOV, VLADIMIR E.¹,
Khabidov, Alexander Sh.¹, LOVTSKAYA, OLGA V.¹, FEDOROVA, ELENA A.²

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, 656038, Russia

²Southern Department of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Gelendjik, 353467, Russia

*Corresponding author: Kovalevskaya, Nelley M., e-mail: knm@iwep.ru

Chlorophyll (Chl) concentrations, total suspended matter (TSM) concentrations, colored dissolved organic matter (CDOM) absorption and inherent optical properties (IOP) of Novosibirsk Reservoir were retrieved using neural network inversion based on MERIS-data in 2007–2011.

Homogeneity regions were discovered in the first optical depth of reservoir. These regions match the peculiarities of morpholithogenesis and are specified by particular properties of Chl, TSM, CDOM and IOP. Spatial and temporal variability of Chl-concentration is a primary indicator of the reservoir water quality in calm weather. When exposed to wind Chl-concentration fields change vertically, mostly in the widest and deepest part of the reservoir.

To restore the distribution of water quality parameters in the depth of the water column, we investigate the opportunities for retrieving bathymetric characteristics. For that we compare the brightness obtained by WorldView-2 spacecraft high spatial and spectral resolution data. Despite the complexity of bathymetric studies in a mesotrophic reservoir, we found the optimal set of channels of the WorldView-2 to preliminary estimate (root-mean-square error RMSE = 1.4 m) of deepwater regions.

The development of combined technology 'retrieval of water quality parameters — bathymetry derivation' provides an opportunity to use the data of satellite constellation Sentinel more efficiently. The Sentinel-3 OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) is based on MERIS technology and will provide data continuity with it. Sentinel-2 provides data of high spatial and spectral resolution.

Keywords: water quality parameters retrieval, neural network inversion, MERIS/ENVISAT, bathymetry, mesotrophic reservoir, WorldView-2.

Acknowledgements. The authors thank DigitalGlobe for providing the Worldview-2 imagery as part of 8-band challenge.

Received 5 November 2015

Received in revised form 22 December 2015