

ЭКОЛОГИЯ

УДК 528.8: 556

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СЕНСОРА LANDSAT 8 (OLI) ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МУТНОСТИ, ЦВЕТНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ВОДЕ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

О.А. Тихомиров¹, А.В. Бочаров¹, А.Б. Комиссаров², С.Д. Хижняк¹,
П.М. Пахомов¹

¹Тверской государственной университет

²Институт водных проблем РАН, г. Конаково

В работе представлены алгоритмы обработки данных дистанционного зондирования Земли, обеспечивающие получение информации о пространственно-временной изменчивости показателей мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» в водных объектах. Суть исследования состоит в разработке моделей, основанных на статистическом анализе зависимостей данных натурных измерений и спектральных характеристик многоканальных спутниковых изображений Landsat-8, с последующим распространением полученных алгоритмов на весь водоем. Осуществлен анализ исследуемых показателей для акватории Иваньковского водохранилища за июнь–август 2015 г. По полученным данным концентрации хлорофилла «а» проведена оценка трофического статуса, биомассы фитопланктона и первичной продукции в различных частях водоема. По результатам исследования выявлены некоторые зависимости пространственного распределения изучаемых параметров и веществ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Landsat, Иваньковское водохранилище, цветность, мутность, хлорофилл, качество воды.

В течение последних десятилетий одним из наиболее значительных направлений в области дистанционного зондирования была разработка гиперспектральных датчиков и необходимого программного обеспечения для анализа получаемых материалов. Появление многоканальных данных позволило использовать многомерное спектральное пространство. Для решения задач стали использовать отношения значений пикселя в двух и более спектральных диапазонах [1]. Использование многоканальной спутниковой информации позволяет решать обширный круг задач по исследованию особенностей земной поверхности.

Исследование пространственно-временной изменчивости свойств водных масс – важная как в научном, так и практическом отношении задача. При изучении качества воды проводятся регулярные натурные измерения показателей. Это довольно трудоемкий и экономически за-

тратный процесс, который часто не охватывает всю площадь водного объекта. Кроме того, наблюдения имеют дискретный характер и, при интерполяции получаемых данных, результаты оказываются лишёнными пространственной точности. Совместное использование, наряду с натурными измерениями, многоканальных спутниковых снимков может быть полезным для оптимизации производимых исследований. Это позволит при помощи бесконтактного определения показателей расширить массив получаемых данных за счет приобретения пространственной картины распределения изучаемых свойств.

Цель работы – апробация использования алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования Земли, обеспечивающих получение информации о свойствах вод внутренних водоемов средней полосы Европейской части России. Известно, что некоторые «индексные изображения», получаемые путем простых преобразований снимков на основе арифметических операций со значениями яркости в различных спектральных зонах [2], показывают существенную корреляцию с оптическими показателями состояния водных масс. Суть работы состоит в разработке моделей, основанных на статистической зависимости данных натурных измерений и количественных спектральных показателей спутниковых изображений, с последующим распространением полученных алгоритмов на весь водоем или группу однотипных водных объектов. В исследовании использовались космические снимки Ивановского водохранилища, полученные сенсором Landsat-8 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Использованные сцены сенсора Landsat-8

Дата	Сцена Landsat-8
2 июня 2015 г.	LC81800202015153LGN00
4 июля 2015 г.	LC81800202015185LGN00
5 августа 2015 г.	LC81800202015217LGN00

Для выявления возможности использования данных дистанционного зондирования, применительно к исследованию состояния Ивановского водохранилища, были проведены полевые экспедиции в течение трех летних месяцев 2015 г. Сбор подспутниковых образцов воды производился в 9 пунктах (рис. 1) в течение 2–3 дней после пролета спутника для последующего анализа в лаборатории. Пробы оценивались по 6 показателям (содержание хлорофилла «а», цветность, мутность, БПК₅, перманганатная окисляемость, жёсткость) и 12 веществам (сульфаты, хлориды, гидрокарбонаты, кальций, магний, железо общее, фосфаты, фосфор общий, аммоний, нитриты, нитраты, кремний).

Материалы лабораторных исследований были использованы для выявления зависимостей между исследуемыми показателями и спектральными характеристиками многоканальной космической съемки

Landsat. В результате установлено, что наиболее значительные статистические зависимости с материалами дистанционного зондирования имели мутность, цветность и содержание хлорофилла «а».



Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб воды в Иваньковском водохранилище

Хлорофилл «а» – основной пигмент зеленых растений, в том числе одноклеточных водорослей (фитопланктона). Из нескольких десятков пигментов, содержащихся в фотосинтетическом аппарате водорослей, хлорофиллу «а» отведена важнейшая роль в процессе фотосинтеза. Информация о концентрации хлорофилла «а» в воде и ее изменчивости в водном объекте служит критерием при оценке запасов биомассы фитопланктона и его продукции, а также индикатором загрязнения вод [3].

Определение хлорофилла «а» проводили на спектрометре «Evolution Array» фирмы «Thermo Scientific» в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90. Значения оптических плотностей брали для четырех длин волн – 664, 647, 630 и 750 нм. С целью определения концентрации хлорофилла измерения проводили дважды: до и после подкисления экстракта несколькими каплями раствора соляной кислоты [3]. Результаты, определенные по данному стандарту, могут быть использованы для калибровки непрямых методов оценки содержания хлорофилла «а», в том числе при космическом зондировании состояния водных объектов.

Хлорофилл действует в первую очередь как поглотитель, в результате чего происходит уменьшение показателей спектральных характеристик, в основном в пределах коротких длин волн, в конце голубой части спектра. Чтобы оценить зависимость между спектральными данными и значениями концентрации хлорофилла, обычно используются статистические методы. При получении сведений о концентрации хлорофилла особое значение имеют полосы поглощения хлорофилла на

длинах волн 445 нм и 665 нм. Максимальное пропускание наблюдается в диапазоне длин волн 520 – 550 нм (рис. 2).

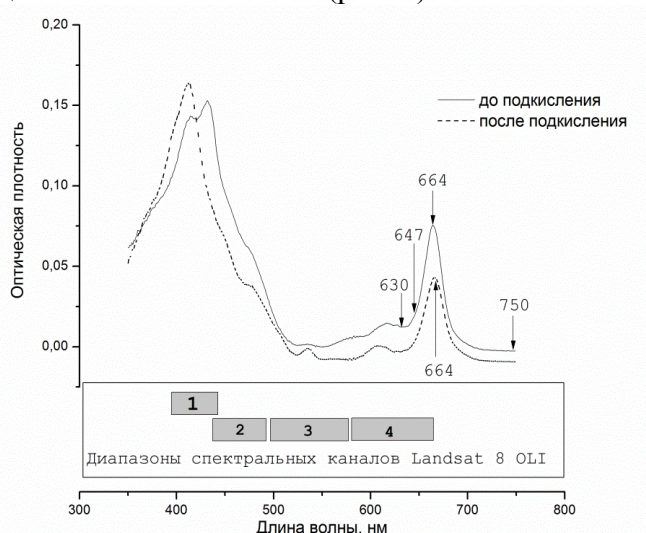


Рис. 2. Пример электронного спектра поглощения пигментами природных вод и используемые длины волн для определения концентрации хлорофилла, а также спектральные каналы Landsat-8 на данном участке спектра

Эти длины волн входят в спектральный диапазон чувствительности каналов Landsat. В исследовании P.A. Brivio и др. [4] в соответствии с моделью, представленной Gitelson и др. [5], впервые было предложено использовать значения отраженного сигнала, принимаемого на сенсоре Landsat-7 для получения значений концентрации хлорофилла «а». Модель Brivio имеет следующий вид:

$$([450,520] - [630,690])/[520,600], \quad (1)$$

данное соотношение (1) демонстрирует высокую статистическую связь со значениями концентрации хлорофилла «а». Для Landsat-8 эти длины волн имеют 2-й канал (b2) – [450,515], 3-й канал (b3) – [525,600] и 4-й канал (b4) – [630,680], соответственно формула (1) принимает следующий вид:

$$(b2 - b4)/b3. \quad (2)$$

По результатам анализа подспутниковых натурных измерений концентрации хлорофилла «а», проведенных в июне – августе 2015 г. на Иваньковском водохранилище, и значений пикселей, полученных в соответствии с моделью, предложенной Brivio, выявлены достаточно высокие статистические связи.

Для моделирования содержания в воде хлорофилла «а» по снимкам сенсора Landsat-8, использовалось отношение разности 2-го и 4-го каналов к 3-му каналу – (b2-b4)/b3. По результатам исследований взаимная связь натурных измерений концентрации хлорофилла «а» и полу-

ченных нами индексных изображений описывается следующим уравнением регрессии:

$$\text{Хлорофилл «а»} = -106,33 \cdot x + 37,91, \quad (3)$$

где $x = (b_2 - b_4) / b_3$, а b_2 , b_3 , b_4 – 2-й, 3-й и 4-й каналы сенсора Landsat-8 соответственно. Зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла «а» и значениями индексных изображений $(b_2 - b_4) / b_3$ представлена на рис. 3.

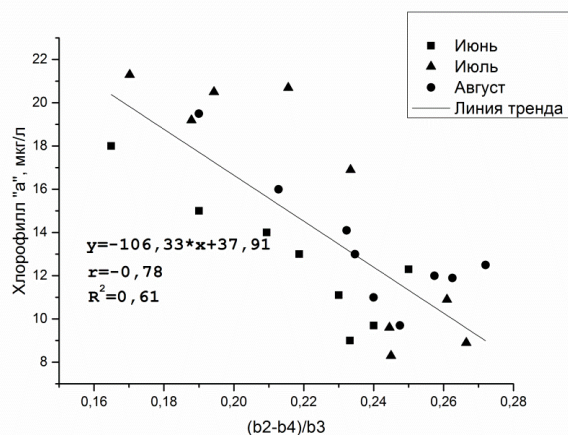


Рис. 3. Зависимость между измеренной концентрацией хлорофилла «а» и значениями индексных изображений $(b_2 - b_4) / b_3$ по данным Landsat-8 (июль-август 2015 г.)

Использование уравнения регрессии (3) позволило получить значения содержания хлорофилла «а» для всей водной поверхности Иваньковского водохранилища с пространственным разрешением 30 м, что, примерно, соответствует карте с масштабом 1:100 000 (рис. 4). Для проверки точности используемой методики было произведено сравнение натуральных и смоделированных значений концентрации хлорофилла «а» (рис. 5).

Пространственное распределение содержания хлорофилла «а» в водоеме (рис. 5) наглядно указывает на его повышенные значения в Шошинском плесе, крупных заливах и в приплотинной области Иваньковского плеса. Преимущественно это области с замедленным водообменом. Например, на Шошинский плес, несмотря на его значительную площадь, приходится не более 17% объема стока водохранилища [6]. Высокие показатели концентрации хлорофилла «а» свидетельствуют об обильном развитии фитопланктона, что зачастую является главной причиной повышенной мутности и цветности водных масс.

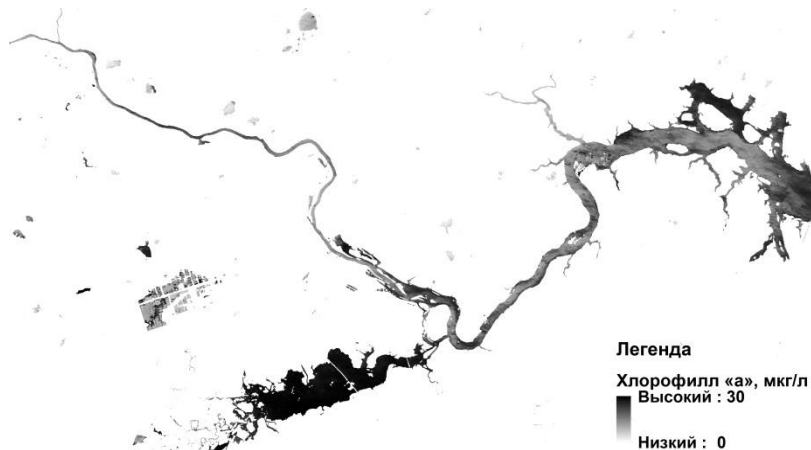


Рис. 4. Растр полученных значений содержания хлорофилла «а» в воде Иваньковского водохранилища, по снимку Landsat-8 (4 июля 2015 г.)

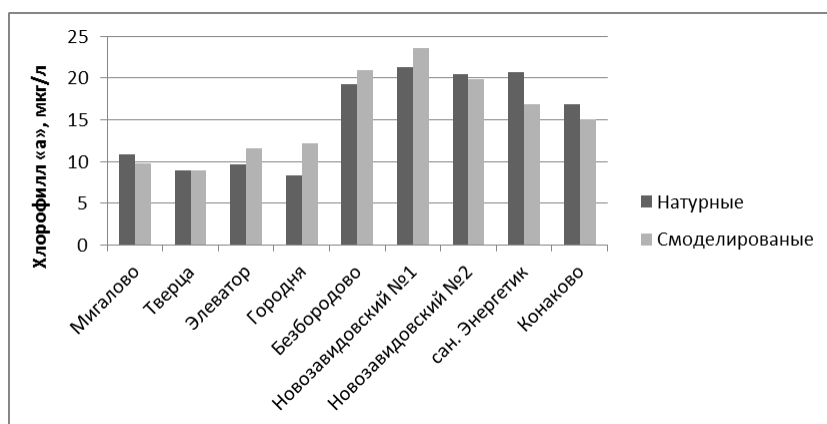


Рис. 5. Натурные и смоделированные значения концентрации хлорофилла «а» в воде Иваньковского водохранилища

Как показывает практика, при нерегулярных наблюдениях содержание хлорофилла «а» в планктоне точнее отражает трофический статус озер, чем скорость фотосинтеза, легко реагирующая на изменения погодных условий. Иными словами, содержание хлорофилла «а» – более консервативный показатель трофности и поэтому, при соблюдении определенных условий, полнее передает продукционный потенциал фитопланктона [7]. В ходе исследований нами была использована классификация типов водоемов по трофности, предложенная С.П. Китаевым (1984) [8] (табл. 2).

При анализе трофического статуса водоема серьезной проблемой является исключительная пространственно-временная изменчивость продукционных характеристик. Известная пятнистость цветения водоема, сильная зависимость продукционных характеристик от сгонно-нагонных явлений и погодных условий требуют проведения учащенных

наблюдений, анализа данных и соответствующего осреднения получаемых значений [7]. Использование данных дистанционного зондирования позволяет решить вопрос пространственного изменения концентраций хлорофилла в водоеме, так как значения концентрации хлорофилла получены не только в дискретных точках, но и смоделированы нами для всей поверхности водоема, в том числе и для труднодоступных мест. Пространственный аспект позволяет производить ранжирование отдельных частей водоема по уровню трофности.

Таблица 2

Типы озер по содержанию хлорофилла, биомассы фитопланктона и первичной продукции (по С.П. Китаеву, 1984)

Тип озер	Хлорофилл, мг/л	Биомасса, г/м ³	Продукция, г С/м ² год
Олиготрофное	<1.5-3	0.5-1	<12.5-25
Мезотрофное	3-12	1-4	25-100
Эвтрофное	12-48	4-16	100-400
Гипертрофное	>48	>16	>400

Так, по растрам распределения концентрации хлорофилла «а», на основании зависимостей, полученных С.П. Китаевым (1984) [8], произведена оценка трофности, биомассы фитопланктона и первичной продукции отдельных плесов и районов Иваньковского водохранилища (табл. 3).

Таблица 3

Оценка трофности, биомассы фитопланктона и первичной продукции Иваньковского водохранилища по содержанию хлорофилла

Пункт	Содержание хлорофилла «а», мкг/л			Трофность (июнь, июль, август)*	Биомасса, г/м ³ , (продукция, г С/м ² год)		
	Июнь	Июль	Август		Июнь	Июль	Август
Волжский плес							
г. Тверь	14 – 15	10 – 14	9 – 11	Э, М, М	4.8 (120)	4.0 (100)	3.3 (83)
п. Эммаус	14 – 16	14 – 16	10 – 11	Э, Э, М	5.0 (125)	5.0 (125)	3.5 (88)
д. Городня	14 – 16	9 – 14	11 – 12	Э, М, М	5.0 (125)	3.8 (95)	3.8 (95)
д. Единоменово	15 – 18	14 – 17	11 – 14	Э, Э, Э	5.3 (133)	5.1 (128)	4.1 (103)
Шошинский плес							
о. Шалимово	15 – 20	19 – 24	15 – 16	Э, Э, Э	5.8 (145)	7.1 (178)	5.1 (128)
д. Гаврилково	19 – 21	23 – 27	16 – 19	Э, Э, Э	6.6 (165)	8.3 (208)	5.8 (145)
ж/д мост	19 – 22	19 – 24	15 – 17	Э, Э, Э	6.8 (170)	7.1 (178)	5.3 (133)
д. Безбородово	19 – 21	18 – 22	15 – 16	Э, Э, Э	6.6 (165)	6.6 (165)	5.1 (128)
Иваньковский плес							
д. Свердлово	14 – 16	12 – 17	11 – 14	Э, Э, Э	5.0 (125)	4.6 (115)	4.1 (103)
г. Конаково	15 – 16	13 – 18	12 – 14	Э, Э, Э	5.1 (128)	5.1 (128)	4.3 (108)
о. Грибаловка	13 – 16	12 – 16	12 – 15	Э, Э, Э	5.5 (138)	4.6 (115)	4.5 (113)
г. Дубна	14 – 17	15 – 19	13 – 15	Э, Э, Э	5.1 (128)	5.6 (140)	4.6 (115)

* М–мезотрофное, Э–эвтрофное.

Согласно результатам исследования водохранилище имеет эвтрофный статус, исключение составляют некоторые участки Волжского плеса, характеризующиеся мезотрофным состоянием. Биомасса фито-

планктона находится в пределах от 3 до 8.5 г/м³, а первичная продукция от 80 до 210 г С/м²год. Наивысшие значения наблюдаются в менее проточном и мелководном Шошинском плесе. Мутность воды — показатель, характеризующий уменьшение прозрачности воды, в связи с наличием неорганических и органических взвесей. Мутность воды в пунктах отбора проб определялась фотометрическим методом, путем сравнения образцов исследуемой воды со стандартной суспензией каолина [9].

Исследования, проведенные Рекка Нарма [10] в поверхностных водах озер Финляндии и прибрежных водах Балтийского моря, показали зависимость отношения спектральных характеристик 1-го канала к сумме 1-го, 2-го и 3-го каналов $b_1/(b_1+b_2+b_3)$ спутника Landsat-7 и показателя мутности воды с коэффициентом корреляции 0.85. Для моделирования значений показателя мутности в акватории Иваньковского водохранилища, по данным сенсора Landsat-8, было использовано несколько модернизированное нами выражение $b_3/(b_2+b_3+b_4)$, показавшее, в ходе экспериментальной части исследования, более высокие результаты, с коэффициентом корреляции до 0.95. Взаимная связь натуральных измерений мутности и данной комбинации спектральных каналов сенсора Landsat-8 (по усредненным данным за июнь-август 2015), описывается следующим уравнение регрессии:

$$\text{Мутность} = 1037,14 *x - 335,33, \quad (4)$$

где $x = b_3/(b_2+b_3+b_4)$, а b_2 , b_3 , b_4 – 2-й, 3-й и 4-й каналы сенсора Landsat-8 соответственно. Зависимость между показателями мутности воды и значениями индексных изображений $b_3/(b_2+b_3+b_4)$ представлена на рис. 6.

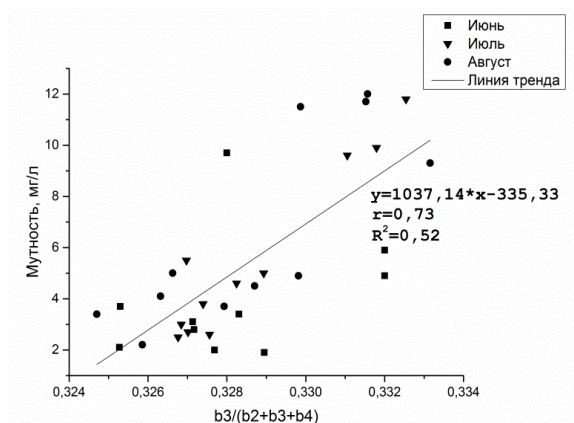


Рис. 6. Зависимость между показателями мутности воды и значениями индексных изображений $b_3/(b_2+b_3+b_4)$ (по данным Landsat-8, июль-август 2015 г.)

Использование уравнения регрессии (4), позволило получить значения показателя мутности для всей поверхности Иваньковского водохранилища (рис. 7).



Рис. 7. Растр полученных значений показателя мутности воды Иваньковского водохранилища, по снимку Landsat-8 (4 июля 2015 г.)

Высокие значения мутности характерны для сильно эвтрофированного Шошинского плеса, крупных заливов и приплотинной области водоема. Причинами повышенной мутности воды могут быть как присутствие тонкодисперсных неорганических взвесей и соединений, так и наличие органических примесей или живых организмов. Также повышенные значения показателя возможны по причине окисления соединений железа и марганца, что приводит к образованию коллоидов.

Для проверки точности полученных результатов было произведено сравнение натуральных и смоделированных значений показателя мутности (рис. 8).

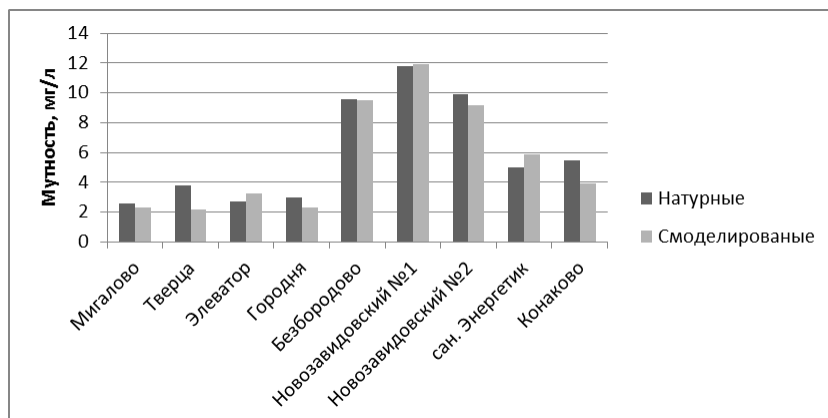


Рис. 8. Натурные и смоделированные значения показателя мутности воды для условий Иваньковского водохранилища

Цветность – природный характерный признак воды, который обычно обуславливается присутствием окрашенного органического вещества (главным образом гуминовых и фульвовых кислот). На цветность воды сильно влияет присутствие железа и других металлов в виде естественных примесей или в качестве продуктов коррозии. Она бывает также обусловлена загрязнением промышленными стоками [11]. Цветность воды в пунктах отбора проб измерялась фотометрическим методом, путем сравнения ее интенсивности с окрашиванием растворов хромово-кобальтовой шкалы.

Экспериментальные исследования, проведенные нами для поверхностных вод Иваньковского водохранилища, выявили зависимость цветности и «модуляционного отношения» [1] 2-го и 4-го каналов Landsat-8 $(b2-b4)/(b2+b4)$, с коэффициентом корреляции до 0,86 (рис. 9).

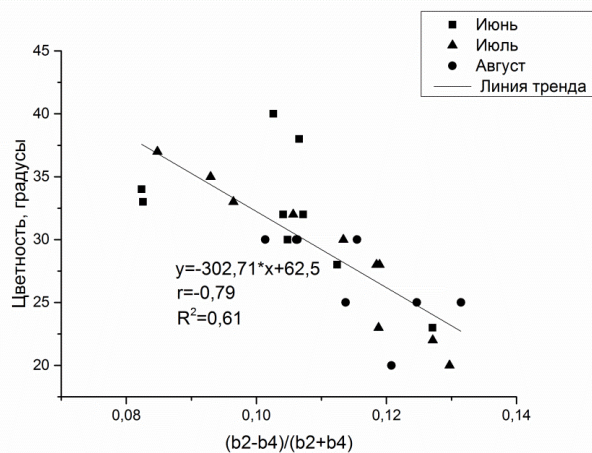


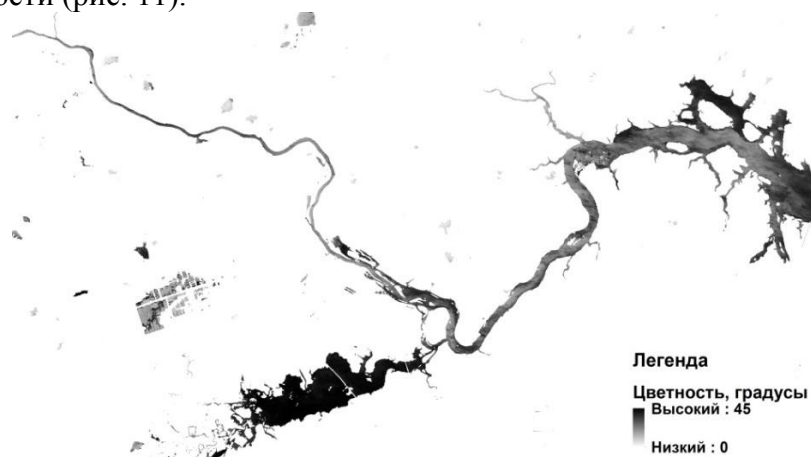
Рис. 9. Зависимость между показателем цветности и значениями индексных изображений $(b2-b4)/(b2+b4)$ (по данным Landsat-8, июль-август 2015 г.)

Взаимная связь натуральных измерений цветности и данной комбинаций спектральных каналов сенсора Landsat-8 описывается следующим уравнением регрессии:

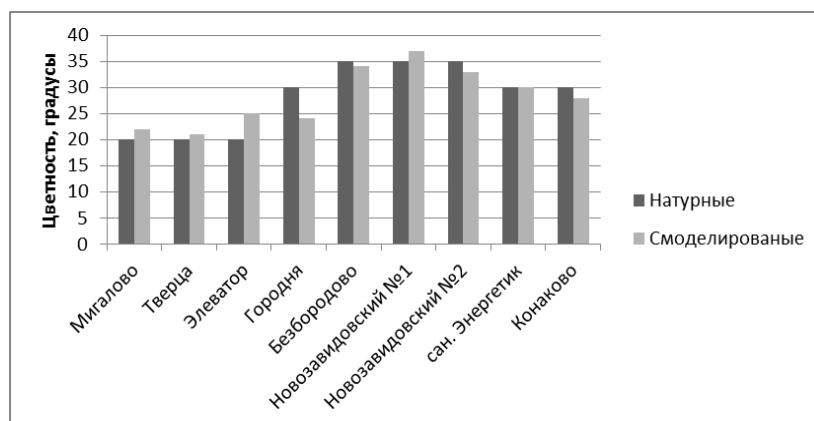
$$\text{Цветность} = -354,67 \cdot x + 67,74, \quad (5)$$

где $x = (b2-b4)/(b2+b4)$, а $b2, b4$ – 2-й и 4-й каналы сенсора Landsat-8.

Используя уравнение регрессии (5), были получены значения показателя цветности для всей поверхности Иваньковского водохранилища (рис. 10). Для проверки точности полученных результатов было произведено сравнение натуральных и смоделированных значений показателя цветности (рис. 11).



Р и с . 10. Растр значений показателя цветности воды Иваньковского водохранилища (по снимку Landsat-8, 4 июля 2015 г.)



Р и с . 11. Натурные и смоделированные значения показателя цветности воды в Иваньковском водохранилище

Наиболее высокие значения цветности характерны для тех же областей, что и для показателей содержания хлорофилла и мутности,

вероятно, в виду повышенного количества взвесей органических веществ. По результатам исследования выявлено, что показатель цветности имеет достаточно высокую линейную связь с перманганатной окисляемостью (рис. 12) и содержанием общего железа (рис. 13). Эти корреляционные связи позволяют дать первичную прогнозную оценку их распределения по растрам цветности.

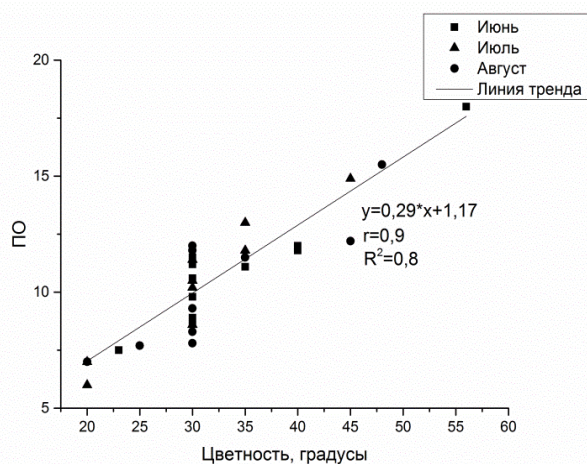


Рис. 12. Зависимость распределения цветности и перманганатной окисляемости воды (Иваньковское вдхр., 2015 г.)

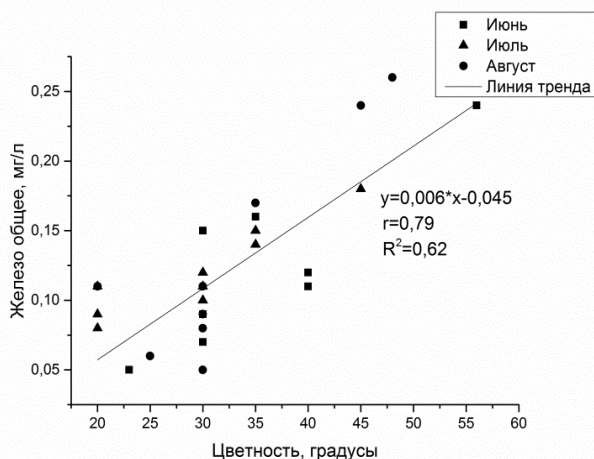


Рис. 13. Зависимость распределения цветности и железа общего в воде (Иваньковское вдхр., 2015 г.)

Концептуальный смысл проведенных исследований состоит в попытке использования информации об изменчивости спектральных свойств многоканальных космических снимков, в качестве критерия при первичной оценке тех или иных параметров водных объектов. В ходе работы нами установлена тесная зависимость между индексными изображениями, получаемыми на основе многоканальных данных с

сенсора Landsat и отобранными образцами воды. Взаимная связь спектральных свойств пикселей индексных изображений и натуральных измерений в точках отбора проб описывалась уравнениями регрессии. На основании пространственно-непрерывных данных спутниковой съемки, используя полученные уравнения регрессии, были построены карты распределения показателей по всей акватории.

По результатам анализа подспутниковых натуральных измерений выявлено, что с достаточно высокой степенью точности возможно определение некоторых оптических показателей состояния водоема. Определенные комбинации спектральных характеристик каналов Landsat, имеют высокие и устойчивые зависимости со значениями мутности (до 0.95), содержанием хлорофилла «а» (до 0.86) и цветностью (до 0.8). При определении концентрации хлорофилла «а», по данным Landsat-8, наилучшие результаты были достигнуты при использовании алгоритма, предложенного Р.А. Brivio, для получения показателя мутности применялась несколько модернизированная нами методика, разработанная Рекка Нagma. Для определения показателя цветности использовалось «модуляционное отношение» 2-го и 4-го каналов, определенное в ходе наших экспериментальных исследований как наиболее подходящее.

По результатам исследования установлено, что в летний период 2015 г. прослеживается тенденция увеличения показателей цветности, мутности и хлорофилла «а» от верхней части водоема к плотине, что связано с большей проточностью Волжского плеса и более благоприятными условиями для развития фитопланктона в приплотинном участке. При этом максимальные значения отмечены в более застойном по режиму, мелководном, озеровидном Шошинском плесе. В течение всего летнего периода 2015 г. водохранилище имеет, преимущественно, эвтрофный статус и, частично, мезотрофный в некоторых районах Волжского плеса. Биомасса фитопланктона находится в пределах от 3 до 8.5 г/м³, а первичная продукция составляет от 80 до 210 г С/м² год.

Проведенная попытка оценки некоторых характеристик водных объектов, на основе материалов дистанционного зондирования Земли, подтверждает возможность использования данной методики. Следует отметить два прикладных аспекта ее применения: 1) полученные уравнения регрессии могут быть в последствии использованы для определения показателей качества воды водохранилища без отбора образцов; 2) предлагаемая методика имеет перспективы применения для оценки пространственного распределения показателей физико-химических свойств воды в сочетании с натурными измерениями.

Список литературы

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Изд-во «Техносфера». 2010. 560 с.
2. Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Изд-во «Академия». 2004. 336 с.
3. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла – а. М.: Изд-во стандартов. 1990. 12 с.
4. Brivio P. A., Giardino C. // Int. J. Rem. Sens., 2001. V. 22(2&3), P 487–502.
5. Gitelson A., Garbuzov G. // International Journal of Remote Sensing, 1993. V. 14, P 1269–1295.
6. Ивановское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Изд-во «Наука». 2000. 344 с.
7. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: Изд-во «ГЕОС». 2007. 252 с.
8. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Изд-во «Наука». 1984. 207 с.
9. ГОСТ 3351-74. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности. М.: Изд-во стандартов. 1974. 8 с.
10. Harma P., Vepsäläinen J. // Sci Total Environ., 2001. V. 268. P 107–121.
11. ГОСТ Р 52769-2007. Вода. Методы определения цветности. М.: Изд-во «Стандартинформ». 2007. 6 с.

USE OF SENSOR LANDSAT 8 (OLI) FOR EVALUATION OF INDICATORS TURBIDITY, COLOR AND CHLOROPHYLL CONTENT IN WATER RESERVOIR IVANKOVSKOYE

O.A. Tikhomirov¹, A.V. Bocharov¹, A.B. Komissarov², S.D. Khizhnyak¹, P.M. Pakhomov¹

¹Tver State University

²Water Problems Institute of RAS, Konakovo

The paper presents algorithms for processing of remote sensing data, provides information about the spatial and temporal variability in turbidity, color, concentration of chlorophyll "a". The essence of the research is to develop models based on the statistical analysis of data dependencies in-situ measurements and spectral characteristics of the multi-channel satellite images Landsat-8, and then disseminate the algorithm on the entire body of water. Implemented analysis investigated indicators for the waters of the reservoir Ivankovskoye June-August 2015. According to the data obtained concentration of chlorophyll "a" assess the trophic status of phytoplankton biomass and primary production in different parts of the reservoir. The study revealed some depending on the spatial distribution of the studied parameters and substances.

Keywords: remote sensing, Landsat, Ivankovskoe Reservoir, color, turbidity, chlorophyll, water quality.

Об авторах:

ТИХОМИРОВ Олег Алексеевич – профессор, заведующий кафедрой физической географии и экологии, Тверской государственной университет, e-mail: tikhomirova@mail.ru

БОЧАРОВ Александр Вячеславович – аспирант, кафедра физической географии и экологии, Тверской государственной университет, e-mail: bochalex@bk.ru

КОМИССАРОВ Алексей Борисович – научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, г. Конаково, e-mail: alecol@inbox.ru

ХИЖНЯК Светлана Дмитриевна – заведующая лабораторией спектроскопии ЦКП, Тверской государственной университет», e-mail: sveta_khizhnyak@mail.ru

ПАХОМОВ Павел Михайлович – профессор, заведующий кафедрой физической химии, Тверской государственной университет, e-mail: pavel.pakhomov@mail.ru

Контактные данные редакционной коллегии

170100, г. Тверь, Садовый пер., д. 35, к. 408

Тел.: (4822) 58-85-72

e-mail: vestnikKhimiya@gmail.com

главный редактор – Папулов Юрий Григорьевич;

ответственный секретарь – Павлов Александр Сергеевич;

технический редактор – Игнатъев Данила Игоревич;

Вестник Тверского государственного университета.

Серия: Химия

№ 2, 2016

Подписной индекс: **80208** (каталог российской прессы «Почта России»)

Подписано в печать 18.03.2016. Выход в свет 30.03.2016.

Формат 70 x 108 ¹/₁₆. Бумага типографская № 1.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,525.

Тираж 500 экз. Заказ № 106.

Тверской государственной университет.

Редакционно-издательское управление.

Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, Студенческий пер., д.12.

Тел. РИУ: (4822) 35-60-63.

Цена свободная