

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Бочаров Александр Вячеславович

**ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ВНУТРЕННЕГО ВОДОЕМА
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
НА ПРИМЕРЕ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

Специальность: 25.00.36 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Тверь, 2021

Работа выполнена на кафедре физической географии и экологии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Научный руководитель: **Тихомиров Олег Алексеевич**
доктор географических наук, доцент, профессор кафедры физической географии и экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Научный консультант: **Лебедев Сергей Анатольевич**
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований, ФГБУН Геофизический центр Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Зимин Алексей Вадимович**
доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории геофизических пограничных слоев, ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Григорьева Ирина Леонидовна кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Ивановской научно-исследовательской станции, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук

Ведущая организация: ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 при ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98, Актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д 212.197.03, Ученому секретарю.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03
к. воен. н., доцент

Соколов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Внутренние водоемы, озера и водохранилища, являясь ценными источниками водных ресурсов, активно используются для целей рыболовства, транспорта, сельского хозяйства, промышленности, отдыха и туризма. В современных условиях аквальные комплексы внутренних водоемов испытывают огромное антропогенное воздействие, превышающее пределы их способностей к самовосстановлению. Мониторинг параметров геосистем с помощью традиционных методов наблюдений: отбор проб воды на месте с последующим лабораторным анализом – требует существенных финансовых и временных ресурсов на их проведение. Традиционные методы дают точечные оценки, а не пространственную картину экологического состояния водоема в целом.

В настоящее время для исследования природных объектов активно применяются методы, использующие данные дистанционного зондирования Земли (далее по тексту – ДЗЗ). Они являются ценным источником информации для изучения земной поверхности, особенно там, где традиционных полевых наблюдений недостаточно или они вовсе отсутствуют. С одной стороны, данные ДЗЗ широко применяются в исследованиях морей и океанов. С другой стороны, несмотря на объективную необходимость, их применение в комплексных исследованиях внутренних водоемов в рамках геоэкологического мониторинга достаточно ограничено. Это связано с необходимостью учета местных особенностей водных масс и недостаточной разработанностью подходов к использованию данных ДЗЗ для применения в исследованиях внутренних водоемов. В частности, для исследования биооптических параметров водных масс требуется применение региональных алгоритмов обработки данных ДЗЗ. Для мелководных водоемов с обширными областями развития прибрежной растительности необходима разработка методик точного выделения береговой линии и границ зон распространения воздушно-водной растительности.

Научная проблема, на решение которой направлена работа – оценка возможности использования данных дистанционного зондирования в оптическом диапазоне для геоэкологического мониторинга внутренних водоемов.

Ключевым **объектом исследования** является Иваньковское водохранилище, расположенное в Тверской и Московской областях, образованное перекрытием русла Волги плотиной у города Дубна.

Предмет исследования – методики применения данных ДЗЗ для геоэкологических исследований внутренних водоемов методами биооптического моделирования параметров воды. В работе на основе обработки спутниковых снимков выполнена оценка мутности, цветности, содержания хлорофилла «а», биомассы фитопланктона, первичной продукции; определен трофический статус, дана характеристика термических свойств водной поверхности, выделены береговая линия и границы области распространённости воздушно-водной растительности.

Целью работы является усовершенствование методов геоэкологического мониторинга и оценка состояния внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ.

Под состоянием водоема понимается характеристика водного объекта по совокупности его количественных и качественных показателей применительно к видам водопользования. В данной работе выбор параметров состояния определялся репрезентативностью для оценки водной геосистемы.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1) проведение экспериментальных исследований, целью которых является оценка возможностей использования данных ДЗЗ для выделения береговой линии водоема, а также границ и площадей зарастания высшей водной растительностью;

2) сбор данных оптически чувствительных параметров водоема путем проведения полевых подспутниковых наблюдений на акватории Иваньковского водохранилища, создание региональных алгоритмов для биооптического моделирования параметров воды;

3) расчет температуры поверхностных вод Иваньковского водохранилища с использованием стандартного алгоритма обработки данных ДЗЗ;

4) построение картосхем распределения исследуемых параметров для всей акватории Иваньковского водохранилища и проведение их пространственного анализа, оценка распространенности воздушно-водной растительности;

5) исследование гидрологических, гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических параметров Иваньковского водохранилища по данным ДЗЗ;

6) проведение исследования трофического состояния Иваньковского водохранилища по данным ДЗЗ;

7) разработка методических схем проведения геоэкологических исследований внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ, оценка их применимости и разработка рекомендаций их дальнейшего использования, с учетом перспективных направлений развития технологий обработки данных ДЗЗ.

Работа написана на основании полевых исследований на акватории Иваньковского водохранилища, проведенных автором в 2015 году. Химический анализ проб воды проводился в лабораториях Тверского государственного университета и Института водных проблем Российской академии наук. В качестве данных ДЗЗ использованы снимки спутника Landsat-8 за период вегетации с мая по август 2015 года. Основу программного обеспечения составили программные продукты ArcGis[®] (картографическое обеспечение работы и пространственный анализ данных), MS Excel[®] (статистические расчеты, их визуализация).

Научная новизна

1. В течение июня – августа 2015 года впервые на акватории Иваньковского водохранилища были проведены комплексные подспутниковые исследования (то есть отбор проб во время проведения спутниковой съемки).

2. Разработан алгоритм выделения береговой линии и алгоритм выделения границ воздушно-водной растительности, на которые получен патент на изобретение.

3. Впервые для Иваньковского водохранилища разработаны региональные алгоритмы определения показателей мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» по данным ДЗЗ оптического диапазона.

4. Разработаны методические схемы проведения исследований внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ оптического диапазона.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработан алгоритм выделения береговой линии внутренних водоемов и границ зон зарастания воздушно-водной растительностью по данным спутника Landsat-8.

2. Получены региональные алгоритмы определения мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» в Иваньковском водохранилище по данным ДЗЗ оптического диапазона, а также построены картосхемы пространственного распределения исследуемых параметров.

3. Подтверждено тепловое загрязнение Иваньковского водохранилища в районе места сброса вод с Конаковской ГРЭС с превышением температуры воды в Мошковском заливе на 3–4°C. Наиболее сильной эвтрофикации подвержен Шошинский плес (средняя глубина 1,9 м), который имеет превышение средних значений концентрации хлорофилла «а» по сравнению с другими акваториями на $4,7 \pm 1,4$ мкг/л, биомассы – на $1,6 \pm 0,2$ г/м³, первичной продукции – на $38,9 \pm 9,6$ г·С/м² в год и мутности – на $2,8 \pm 0,9$ мг/л.

4. Разработан комплекс методических схем для проведения исследований внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ оптического диапазона.

Теоретическая ценность работы состоит в разработке методик исследования внутренних водоемов по данным ДЗЗ оптического диапазона.

Практическая значимость работы:

1. Для Иваньковского водохранилища разработаны региональные алгоритмы обработки данных ДЗЗ оптического диапазона для оценки концентрации хлорофилла «а», показателей мутности и цветности. Их применение возможно как для будущих, так и для ретроспективных данных.

2. Разработан алгоритм выделения береговой линии внутренних водоемов и границ зон зарастания воздушно-водной растительностью по данным ДЗЗ оптического диапазона (спутника Landsat-8), который был использован для уточнения областей развития воздушно-водной растительности на акватории Иваньковского водохранилища.

3. Исследованы гидрологические (актуализированы границы водоема), гидрофизические (температуры поверхностных вод, мутность), гидрохимические (цветность), гидробиологические (концентрация хлорофилла «а», биомасса фитопланктона, продуктивность, площади зарастания воздушно-водной растительности) параметры Иваньковского водохранилища и построены соответствующие картосхемы.

4. Разработаны методические схемы для исследований внутренних водоемов на основе современных технологий обработки данных ДЗЗ оптического диапазона.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 25.00.36 – «Геоэкология»:

п. 1.8. Природная среда и геоиндикаторы ее изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны.

п. 1.9. Оценка состояния, изменений и управление современными ландшафтами.

п. 1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля.

Методы и данные исследования

В работе использованы данные ДЗЗ оптического диапазона, полученные сенсорами, расположенными на борту искусственного спутника Земли, путем измерения отраженного от водной поверхности солнечного излучения. Использован стандартный алгоритм определения температуры поверхности воды по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне, а также применены алгоритмы исследования биооптических параметров водных масс, которые основаны на поглощении, рассеянии электромагнитного излучения в воде, полученные методом линейной регрессии данных ДЗЗ и подспутниковых *in situ* измерений. Для пространственного анализа территориальных закономерностей экологических свойств использованы методы моделирования в ГИС.

Апробация работы

Основные положения обсуждались на V Всероссийском с международным участием медико-биологическом конгрессе молодых ученых «Симбиоз-Россия 2012» (Тверь); II Всероссийской научно-практической конференции «География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов» (Тверь, 2014); Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014–2017); III Всероссийской научно-практической конференции «География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов» (Тверь, 2015); конгрессе молодых ученых-географов «ГеоПоиск-2016» (Тверь); V Всероссийской научно-практической конференции «География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов» (Тверь, 2017); VIII Всероссийской научно-практической конференции «География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов» (Тверь, 2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 статей, в том числе 3 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (перечень

ВАК), и 1 статья в журнале, включенном в международные библиографические и реферативные базы Scopus и Web of Science. Получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

Автор работы самостоятельно выполнил все этапы исследования: постановка задач исследования, определение пунктов отбора проб, проведение подспутниковых экспериментов (сбора проб воды). Также лично автором были выполнены следующие работы: подготовка проб в полевых условиях и их анализ в лаборатории спектроскопии Тверского государственного университета, обработка спутниковых снимков, компьютерное моделирование, разработка региональной ГИС и др. Для сбора информации о распространенности водной растительности автором были проведены многочисленные маршрутные наблюдения вдоль береговой линии.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем рукописи составляет 139 страниц машинописного текста, 54 рисунка и 18 таблиц. Список использованной литературы содержит 101 наименование, в том числе 46 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена новизна полученных научных результатов, их теоретическая ценность и практическая значимость, приведены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе выполнен анализ предметной области, приводятся физические основы географических исследований на основе данных ДЗЗ, рассмотрены виды ДДЗ и их методы их обработки.

Рассмотрены физические основы ДЗЗ в исследованиях водных объектов: особенности взаимодействия электромагнитного излучения с водой (спектральные свойства чистых и природных вод и спектральные свойства электромагнитного излучения от поверхности водоема).

Рассмотрены направления исследований водных объектов из космоса в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра (оптический диапазон). Выявлены особенности применения данных ДЗЗ в исследованиях внутренних водоемов: большое количество растворенных и взвешенных веществ, малый масштаб водных объектов, обширная береговая линия и мелководья.

Во второй главе дается характеристика объекта исследования. Рассматриваются морфометрические параметры плесов Иваньковского водохранилища и его водосборного бассейна. Приведена информация о геологическом строении, почвенном покрове и климате. Дана характеристика гидрографической сети водосборного бассейна, определена локализация промышленных объектов.

По данным цифровой модели рельефа, построенной на основе радарной топографической съемки SRTM, определена структура стока в водосборном бассейне и его особенности:

– наиболее крупные водосборные области имеют р. Волга, р. Шоша (с притоками затопленного русла), р. Тверца;

– около 23,3% водосборной площади водохранилища находится ниже г. Тверь по течению р. Волга, и сток с этой территории находится в зоне подпора водохранилища;

– водосборный бассейн Шошинского плеса составляет лишь 15% от всего водосбора водохранилища, несмотря на то, что плес занимает 35% от площади водоема, этим объясняется меньший расход воды и замедленный водообмен в этой части водоема.

Приведена характеристика сенсоров видимого и инфракрасного диапазонов спутника Landsat-8 и рассматриваются примеры обработки получаемых ими данных. Приводится схема расположения пунктов отбора проб (рис. 1) и обоснование их выбора.

В третьей главе приведены результаты исследования Иваньковского водохранилища на основе данных ДЗЗ в оптическом диапазоне (выделены береговая линия водоема и границы зоны распространения воздушно-водной растительности, исследованы термический режим, мутность, цветность и концентрация хлорофилла «а», трофический статус, биомасса фитопланктона, первичная продукция).



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

Алгоритм выделения береговой линии водных объектов и выделения границ зон зарастания воздушно-водной растительностью по данным сенсора OLI спутника Landsat-8. По сравнению с сушей вода сильнее поглощает электромагнитное излучение в ближнем ИК диапазоне, поэтому этот участок спектра использовался для определения границы между сушей и водными объектами, которые не очевидно различимы в видимом свете (рис. 2). Для данных спутника Landsat-8 наилучший контраст между водной поверхностью и сушей проявляется в 5-м канале (0.845–0.885 мкм).

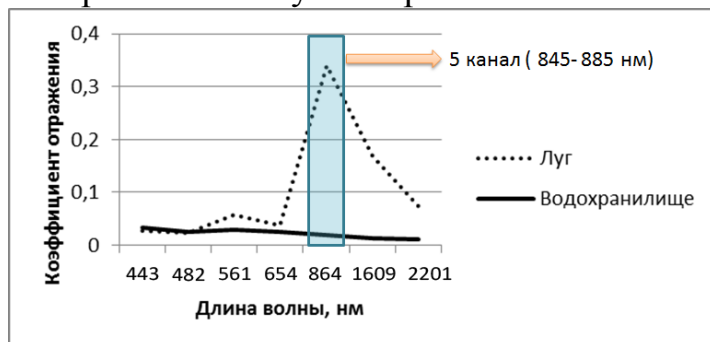


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от длины волны для различных подстилающих поверхностей: луг, водохранилище

Расчет порогового значения между группами пикселей производился на основе профилей переходной зоны. При помощи ГИС-редактора составлено несколько графиков профилей прибрежной зоны в ближнем ИК-диапазоне, содержащих часть берега и часть водной поверхности (рис. 3б).

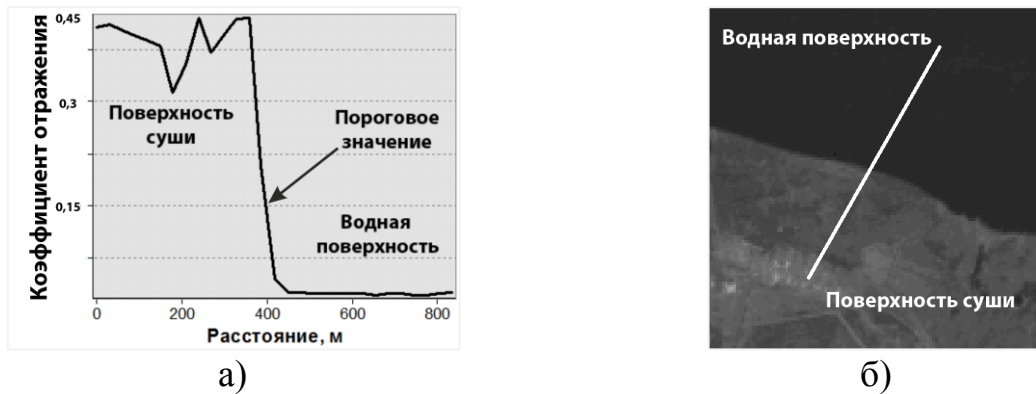


Рис. 3. Пример выделения береговой линии водоема на основе деления пикселей ИК канала по пороговому значению коэффициентов отражения:

а – график значений коэффициентов отражения прибрежной зоны вдоль профиля;
б – профиль прибрежной зоны на снимке

Пиксели соответствующие водной поверхности имеют низкую отражательную способность, в то время как пиксели соответствующие суше характеризуются более высоким коэффициентом отражения (рис. 3а). В нашем случае пороговое значение коэффициента отражения между пикселями соответствующими суше и водной поверхности составило около 0,15. Разработанный алгоритм позволил выделить границы Иваньковского водохранилища (рис. 4).



Рис. 4. Границы водных объектов выделенные по данным ДЗЗ спутника Landsat-8

Воздушно-водная растительность располагается в прибрежной мелководной зоне водного объекта. На основании полевых обследований были определены спектральные характеристики зон развития воздушно-водной растительности, которые показали, что присутствие водной растительности проявляется в повышении значений отражательной способности как в видимом, так и ближнем ИК диапазонах (рис. 5).

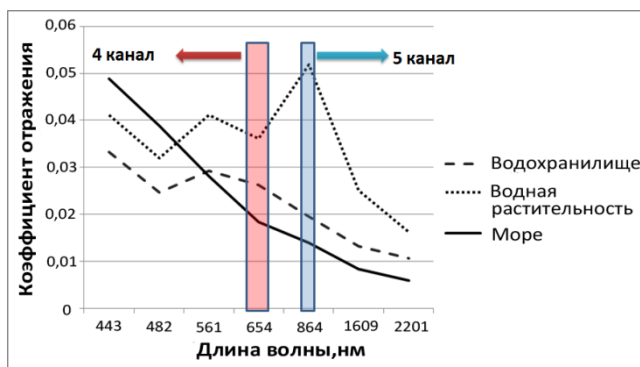


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от длины волны для различных подстилающих поверхностей

Установлено, что участки развития воздушно-водной растительности, проявляются в превышении значений отражательной способности в ближнем ИК (b5 канал Landsat-8 (0,845–0,885 мкм)) над красным (b4 канал Landsat-8 (0,630–0,680 мкм)).

Алгоритм выделения ареалов воздушно-водной растительности основан на оценке наклона спектра на

участке 0.630–0.885 мкм. Для этого предлагается использовать коэффициент характеризующий угол наклона спектра (k) который рассчитывается по следующей формуле: $k = b_4/b_5$. Если $k < 1$, то пиксель относится к воздушно-водной растительности, если $k > 1$, – к чистой водной поверхности. На рис. 6 приводится пример выделенных областей распространения воздушно-водной растительности в районе пос. Старое Мелково.



Рис. 6. Пример выделения областей распространения воздушно-водной растительности по снимку сенсора OLI спутника Landsat-8 (4 июля 2015 года, район пос. Старое Мелково): 1 – чистая водная поверхность, 2 – участки развития воздушно-водной растительности

Региональные алгоритмы расчета мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» в Иваньковском водохранилище по данным сенсора OLI спутника Landsat-8. Для оценки состояния водных масс Иваньковского водохранилища использовались космические снимки, полученные спутником Landsat-8 в летние месяцы 2015 г. Благодаря благоприятным погодным условиям, в мае – августе 2015 г., с интервалом около месяца, спутником Landsat-8 были получены безоблачные сцены для района Иваньковского водохранилища. Также в этот период на водоеме велись подспутниковые натурные наблюдения в точках. Отбор проб воды производился в 9 пунктах в течение 1–2 дней после пролета спутника. Выбор точек отбора проб осуществлялся с учетом максимального покрытия площади водохранилища и транспортной доступности.

Для мутности, цветности и концентрации хлорофилла «а» были определены статистические связи между спектральными данными и значениями натурных измерений исследуемых параметров в точках. Были выявлены наиболее значимые комбинации спектральных каналов сенсора OLI спутника Landsat-8 обладающие наиболее высокой статистической связью с данными подспутниковых наблюдений. В ходе исследований по усредненным данным за май-август 2015 г. были получены уравнения линейной регрессии, составляющие основу региональных алгоритмов для определения показателей мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» в Иваньковском водохранилище (рис. 7, табл. 1).

Согласно модели, предложенной С.П. Китаевым, биомасса и первичная продукция имеют линейную зависимость с концентрацией хлорофилла.

Таблица 1

Взаимная связь исследуемых параметров и данных спутника Landsat-8

Показатель	Комбинация каналов сенсора OLI спутника Landsat-8	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации (R^2)
Мутность	$b2/(b2+b3+b4)$	$-76,05 \cdot x + 27,39$	0,69
Цветность	$b2 - b4$	$-1013 \cdot x + 25,88$	0,54
Хлорофилл «а»	$(b2-b4)/b3$	$-29,28 \cdot x + 10,86$	0,78

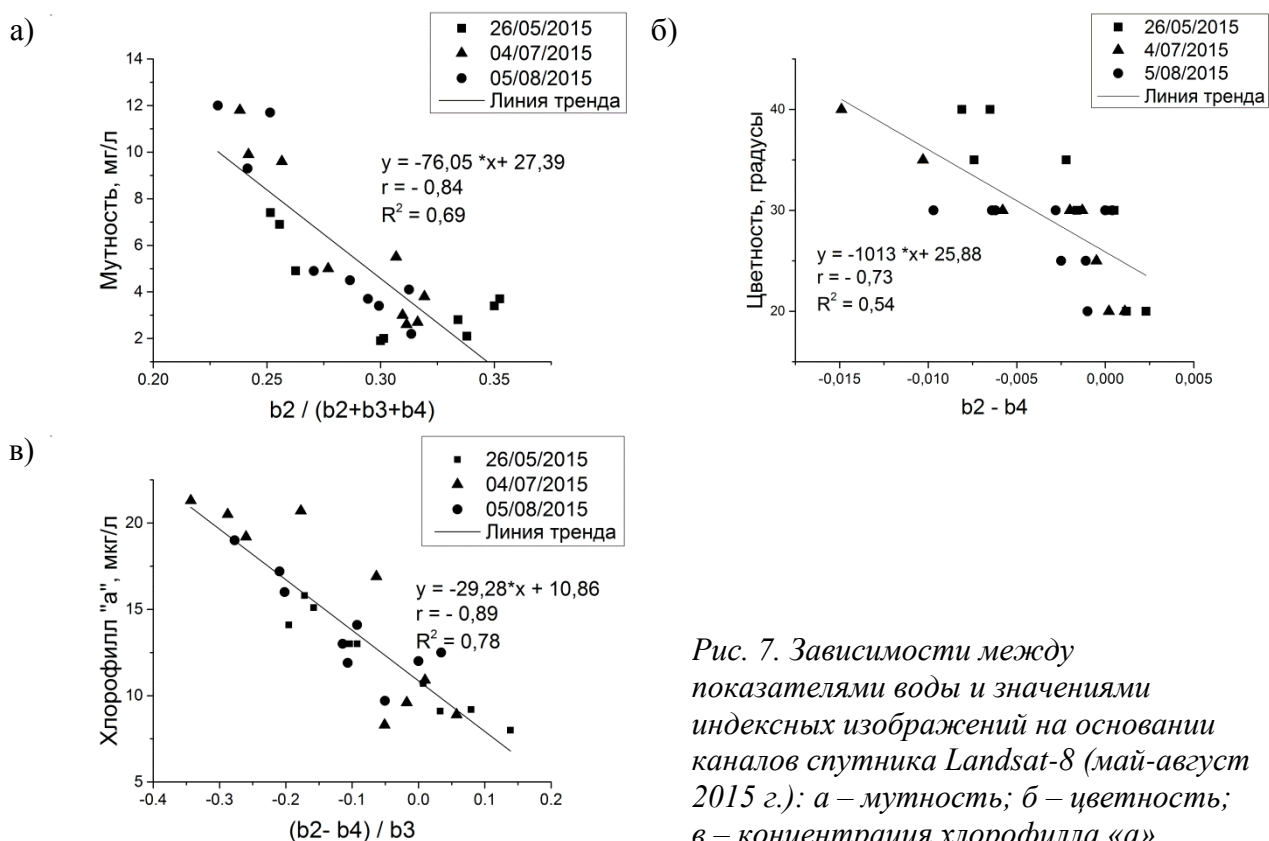


Рис. 7. Зависимости между показателями воды и значениями индексных изображений на основании каналов спутника Landsat-8 (май-август 2015 г.): а – мутность; б – цветность; в – концентрация хлорофилла «а»

Основываясь на этой модели, в работе были предложены следующие уравнения регрессии, описывающие связь хлорофилла с биомассой и первичной продукцией:

$$\text{Биомасса} = 0,3333 \cdot x,$$

$$\text{Первичная продукция} = 8,3333 \cdot x,$$

где x – это концентрации хлорофилла.

Для исследования термического режима водоема были использованы данные ИК диапазона сенсора TIRS спутника Landsat-8. Значения яркостной температуры рассчитывалась по стандартному алгоритму. Для чистой воды излучательная, способность которой, близка к единице, поэтому яркостная температура водной поверхности практически соответствует фактической температуре.

Построение картосхем пространственного распределения исследованных параметров. Растры яркостной температуры позволили получить картосхемы распределения температуры водной поверхности Иваньковского водохранилища с пространственным разрешением 100 м (рис. 8). Региональные

алгоритмы позволили получить картосхемы концентраций хлорофилла «а», показателя мутности и цветности для всей водной поверхности Иваньковского водохранилища с пространственным разрешением 30 м (рис. 9–11).

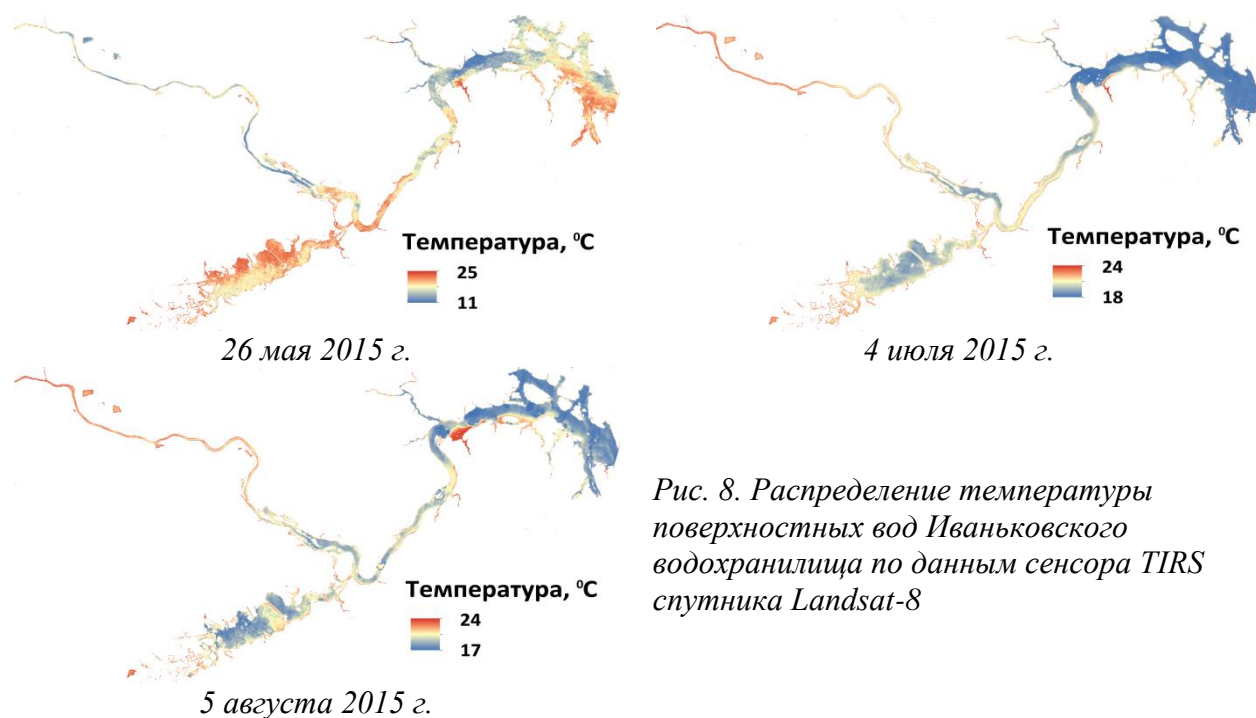


Рис. 8. Распределение температуры поверхностных вод Иваньковского водохранилища по данным сенсора TIRS спутника Landsat-8

По результатам пространственного анализа выявлены следующие зависимости распределения изучаемых параметров:

1) Картосхемы температуры водной поверхности подтвердили лучший прогрев мелководных участков, в особенности верхней части Волжского плеса, всего Шошинского плеса, и заливов Иваньковского плеса. В начале лета наилучший прогрев наблюдается в Шошинском плесе. В июле-августе наиболее сильно прогрет Волжский плес. Пиковые значения температуры водной поверхности наблюдались в Мошковском заливе, который является местом сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС. Благодаря применению данных ДЗЗ визуализированы потоки теплового загрязнения (рис. 12), что позволяет оценить антропогенное воздействие на данную часть акватории Иваньковского водохранилища. В среднем температура воды в Мошковском заливе на 3–4°С выше, чем у окружающих вод не подверженных тепловому загрязнению. Пиковые значения проявлялись в превышении температуры воды на 5–7°С, чем в среднем по водохранилищу. Средние температуры водной поверхности приводятся в табл. 2.

2) В течение мая–августа 2015 г. мутность в Иваньковском водохранилище находилась в пределах от 0 до 15 мг/л. 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 мутности возможны по

причине окисление соединения железа и марганца насыщающих водную массу, что приводит к образованию коллоидов. Средние значения показателя мутности в Иваньковском водохранилище по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 приводятся в табл. 3.

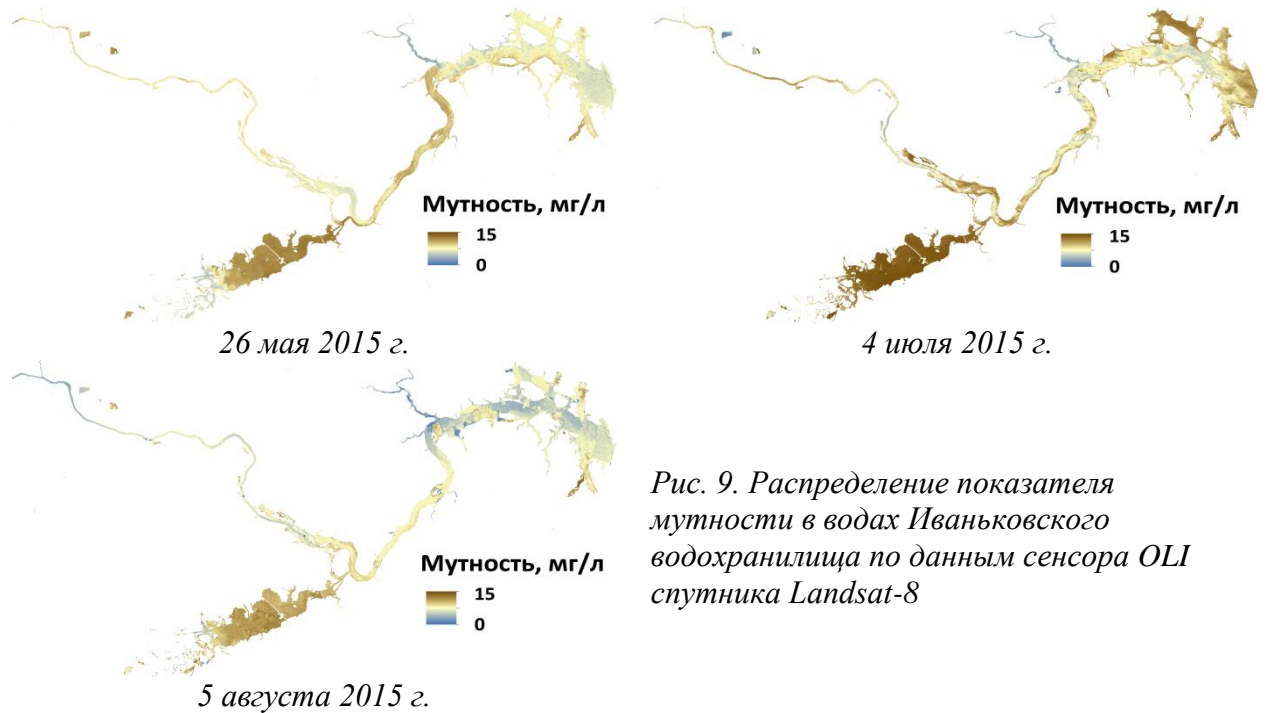


Рис. 9. Распределение показателя мутности в водах Иваньковского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8

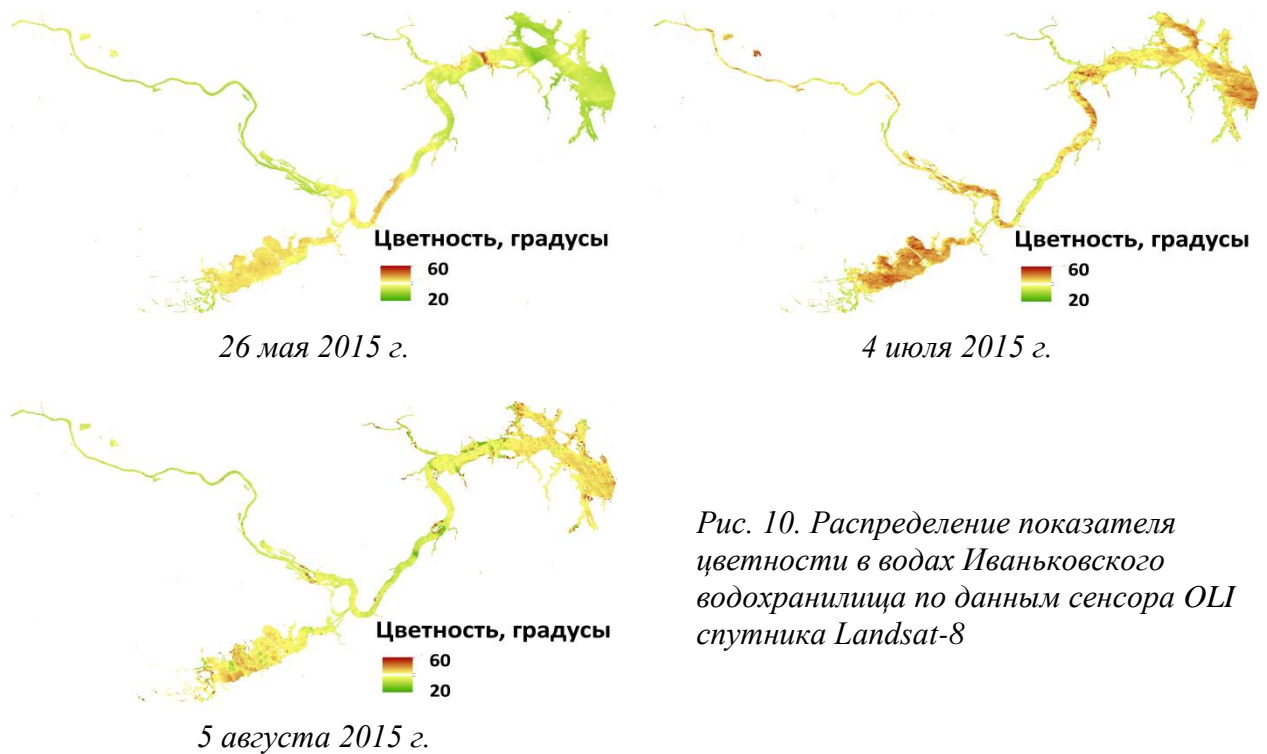


Рис. 10. Распределение показателя цветности в водах Иваньковского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8

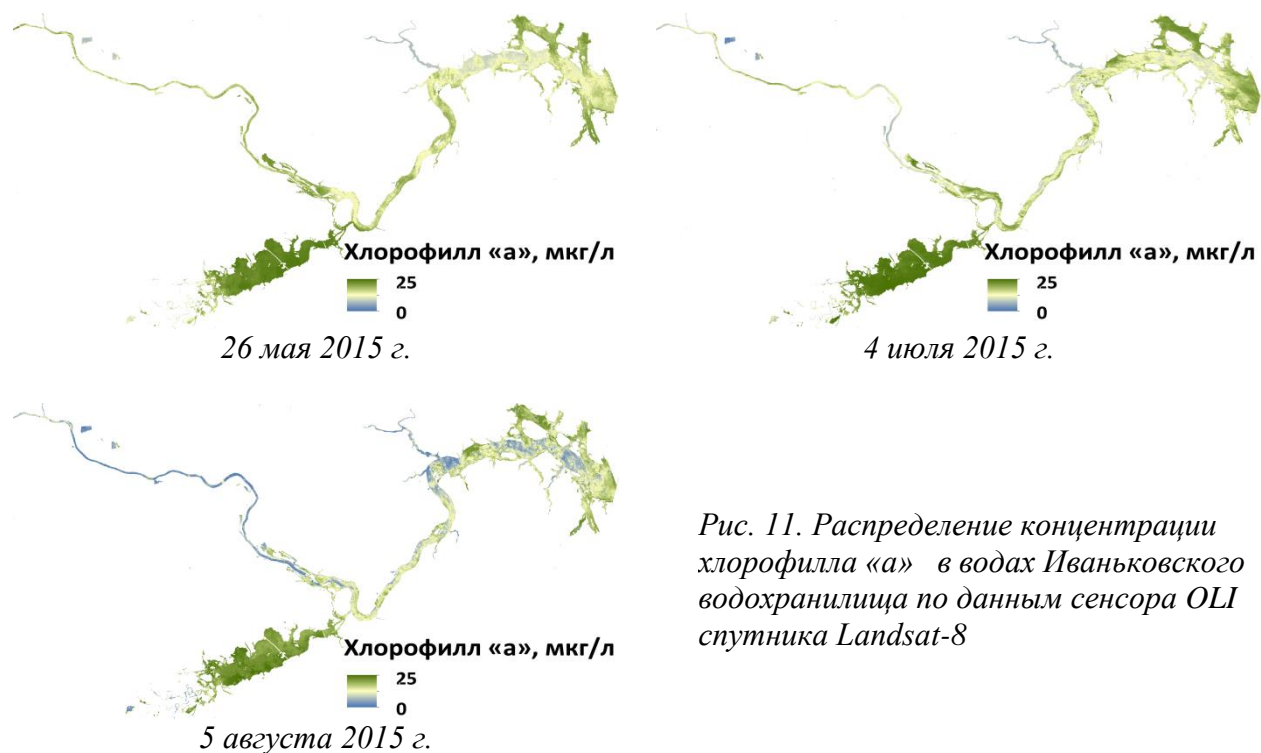


Рис. 11. Распределение концентрации хлорофилла «а» в водах Иваньковского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8

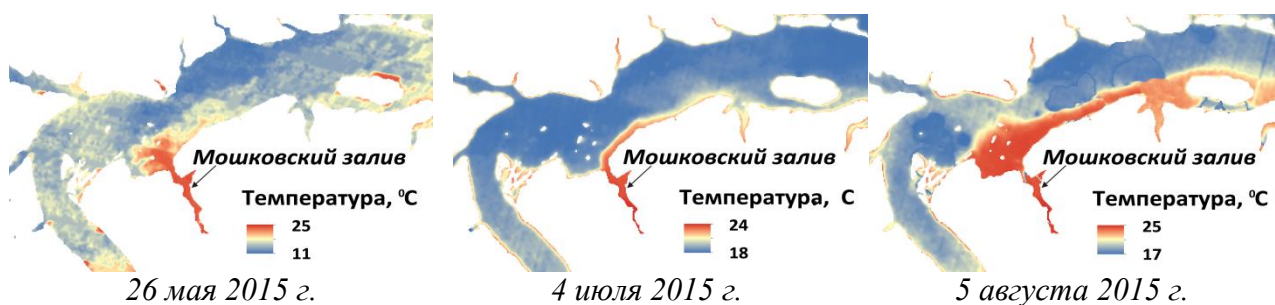


Рис. 12. Распределение температуры поверхностных вод в Можковском заливе по данным сенсора TIRS спутника Landsat-8

Таблица 2.

Средняя температура водной поверхности Иваньковского водохранилища по данным сенсора TIRS спутника Landsat-8 в 2015 г.

Плес	Температура водной поверхности, °С, (средняя температура водной поверхности, °С)		
	26 мая	4 Июля	5 Августа
Волжский	11-23 (14.0)	19-25 (21.3)	17-25 (18.6)
Шошинский	13-20 (15.1)	19-25 (20.8)	17-23 (18.3)
Иваньковский	11-23 (14.1)	18-25 (20.1)	17-24 (18.0)
Весь водоем	11-24 (14.4)	18-25 (20.5)	17-21 (18.1)

3) В течение мая-августа 2015 г. показатель цветности находился в пределах от 20 до 60 градусов. Средняя цветность водоема составляла около 30 градусов. В исследуемый период сильных колебаний цветности не замечено, однако зафиксировано небольшое повышение в июле. Основным фактором

изменения цветности являются растворенные в воде органические вещества, увеличение количества которых создает условия к развитию фитопланктона и водной растительности, что в последствие усиливает эвтрофикацию водоема. Средние значения показателя цветности в Иваньковском водохранилище по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 приводятся в табл. 4.

Таблица 3.

Средние значения показателя мутности в Иваньковском водохранилище по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в 2015 г.

Плес	Мутность, мг/л (средняя мутность, мг/л)		
	26 мая	4 Июля	5 Августа
Волжский	0 – 7 (3,3)	2 – 13 (5,2)	0 – 15 (5,3)
Шошинский	0 – 14 (7,2)	2 – 14 (7,4)	0 – 14 (8,2)
Иваньковский	0 – 8 (3,4)	0 – 11 (3,0)	0 – 12 (4,3)
Весь водоем	0 – 13 (4,5)	0 – 14 (4,6)	0 – 15 (5,7)

Таблица 4.

Средние значения показателя цветности в Иваньковском водохранилище по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в 2015 г.

Плес	Цветность, градусы (средняя цветность, градусы)		
	26 мая	4 Июля	5 Августа
Волжский	22 – 60 (30)	23 – 52 (32)	20 – 56 (27)
Шошинский	27 – 52 (32)	25 – 57 (32)	24 – 55 (30)
Иваньковский	24 – 39 (29)	26 – 59 (32)	22 – 54 (31)
Весь водоем	22 – 60 (31)	23 – 59 (32)	20 – 56 (30)

4) В течение мая-августа 2015 г. концентрация хлорофилла «а» находилась в пределах от 1 до 25 мкг/л. Анализ результатов исследований показал, что основным фактором развития фитопланктона является глубина и проточность частей водоема. В мае обнаружена статистическая зависимость между концентрацией хлорофилла «а» и температурой водной поверхности (коэффициент корреляции 0,4). В остальные месяцы она отсутствует. Вероятно, в начале летнего сезона температура водной поверхности является лимитирующим фактором развития фитопланктона. Следует отметить тесную связь между мутностью и концентрацией хлорофилла «а» (коэффициент корреляции 0,6–0,8). Из этого следует, что развитие фитопланктона является основным фактором уменьшения прозрачности воды. Средние значения концентрации хлорофилла «а» в водах Иваньковского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 приводятся в табл. 5, а оценка биомассы фитопланктона и первичной продукции – в табл. 6.

5) В течение исследуемого периода биомасса фитопланктона находилась в пределах от 2.6 до 7.6 г/м³, а первичная продукция от 67 до 192 г С/м² в год.

6) Наивысшие средние значения концентрации хлорофилла «а», биомассы, первичной продукции, и мутности, в течение мая-августа 2015 г. наблюдались в Шошинском плесе (средняя глубина 1,9 м), где зафиксировано превышение средних значений концентрации хлорофилла «а» по сравнению с

другими акваториям на $4,7 \pm 1,4$ мкг/л, биомассы – на $1,6 \pm 0,2$ г/м³, первичной продукции – на $38,9 \pm 9,6$ г·С/м² в год и мутности – на $2,8 \pm 0,9$ мг/л.

Таблица 5.

Средние значения концентрации хлорофилла «а» в водах Ивановского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в 2015 г.

Плес	Концентрация хлорофилла «а», мкг/л, (средняя концентрация хлорофилла «а», мкг/л)		
	26 мая	4 Июля	5 Августа
Волжский	11 – 19 (15,1)	8 – 19 (13,2)	8 – 19 (12,1)
Шошинский	11 – 22 (18,5)	10 – 23 (18,1)	10 – 22 (15,7)
Иваньковский	8 – 19 (14,2)	8 – 18 (13,3)	8 – 19 (12,6)
Весь водоем	8 – 22 (15,6)	8 – 23 (14,7)	8 – 22 (13,4)

Таблица 6.

Оценка биомассы фитопланктона и первичной продукции Ивановского водохранилища по содержанию хлорофилла «а» в 2015 г.

Плес	Биомасса, г/м ³ , (средняя биомасса, г/м ³)			Продукция, г С/м ² год, (средняя продукция, г С/м ² год)		
	26 мая	4 Июля	5 Августа	26 мая	4 Июля	5 Августа
Волжский	3,6-6,3 (5,1)	2,6-6,3 (4,4)	2,6-6,3 (4,0)	92-158 (126)	67-158 (110)	67-158 (101)
Шошинский	3,6-7,3 (6,2)	3,3-7,6 (6,0)	3,3-7,3 (5,2)	92-183 (154)	83-192 (151)	83-183 (131)
Иваньковский	2,6-6,3 (4,7)	2,6-6,3 (4,4)	2,6-6,3 (4,2)	67-158 (118)	67-150 (111)	8-158 (105)
Весь водоем	2,6-7,3 (5,2)	2,6-7,6 (4,9)	2,6-7,3 (4,5)	67-183 (130)	67-192 (123)	8-183 (112)

7) Воздушно-водная растительность медленно разлагается, способствует заболачиванию, эвтрофикации и сплавинообразованию, насыщению водной массы органическим веществом, что обеспечивает ухудшение качества воды. Согласно полученным результатам, распространение воздушно-водной растительности в период ее максимального развития достигает 12% от площади водохранилища. На момент исследования площадь водохранилища составляла 229,6 км², а площадь занятая воздушно-водной растительностью 27,4 км².

Наиболее универсальной характеристикой водного объекта по совокупности его количественных и качественных показателей является трофический статус. Застойный режим водохранилища обуславливает накопление в нем органических и биогенных веществ, что ведет к повышению биологической продуктивности водных объектов, то есть к эвтрофированию. Согласно работам В.В. Дмитриева выделяется 24 критерия трофности водных экосистем. По данным ДЗЗ в оптическом диапазоне можно определить только концентрацию хлорофилла «а», а также рассчитанные по ней биомассу и первичную продукцию. В данной работе определение трофического состояния проводилось по значениям концентрации хлорофилла «а». Результаты исследования показали, что с высокой долей вероятности, согласно большинству использованных классификаций трофности, Ивановское водохранилище имеет эвтрофное состояние. Исключение составляют некоторые участки Волжского и Ивановского плесов, характеризующиеся мезотрофным состоянием (рис. 13).

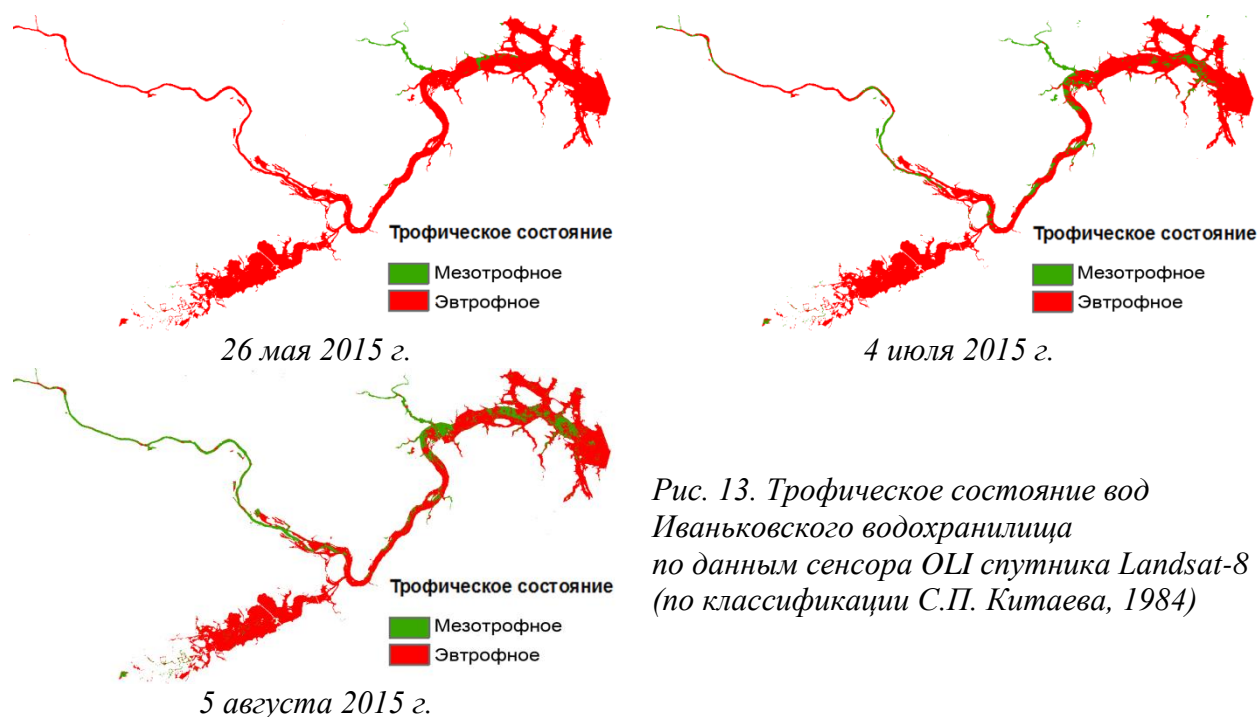


Рис. 13. Трофическое состояние вод Иваньковского водохранилища по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 (по классификации С.П. Кутаева, 1984)

По результатам экспериментальных изысканий, был разработан комплекс методических схем для проведения исследований внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ в оптическом диапазоне. В работе представлены блок-схемы описывающие шаги для определения границ водоема и зон распространения воздушно-водной растительности; температуры водной поверхности, мутности, цветности и концентрации хлорофилла «а» (рис. 14–18).



Рис. 14. Блок схема алгоритма определения береговой линии водного объекта и границ зон распространения воздушно-водной растительности по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в оптическом диапазоне

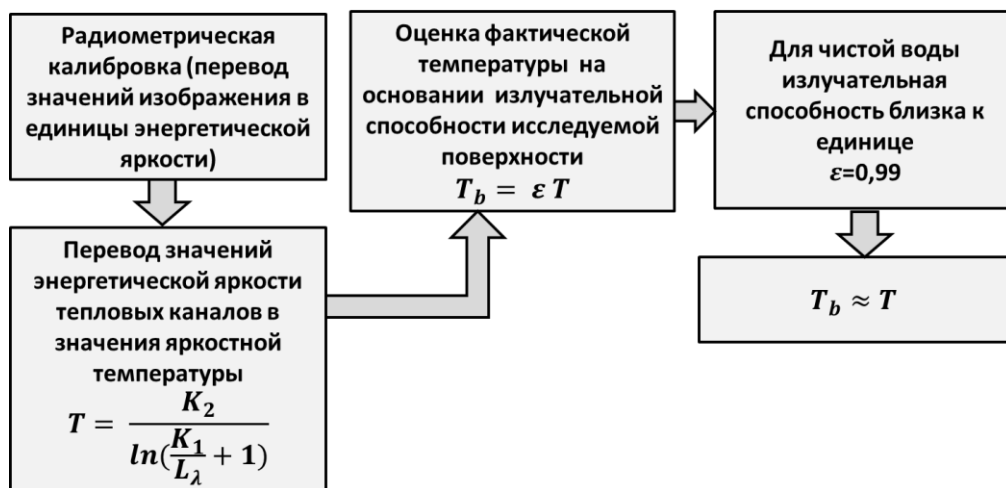


Рис. 15. Блок схема алгоритма определения температуры поверхности воды по данным сенсора TIRS спутника Landsat-8 в оптическом диапазоне

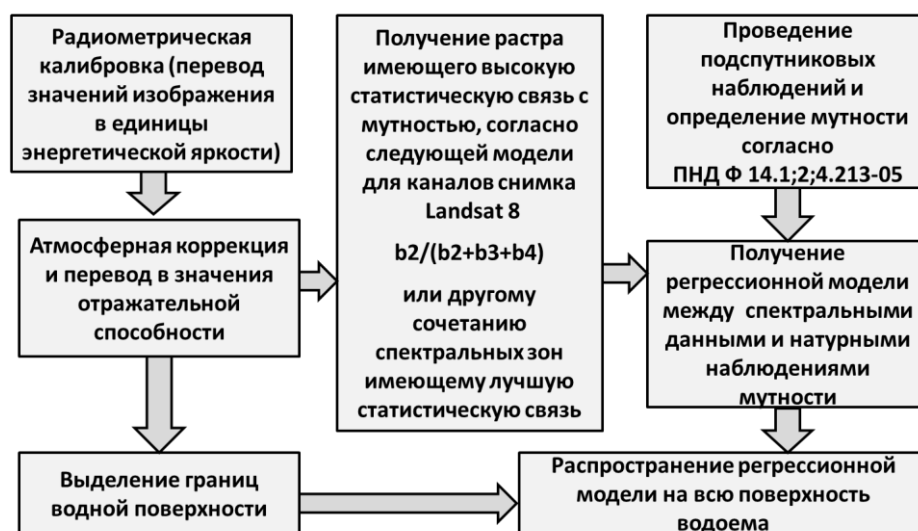


Рис. 16. Блок схема алгоритма определения мутности воды по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в оптическом диапазоне



Рис. 17. Блок схема алгоритма определения цветности воды по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в оптическом диапазоне

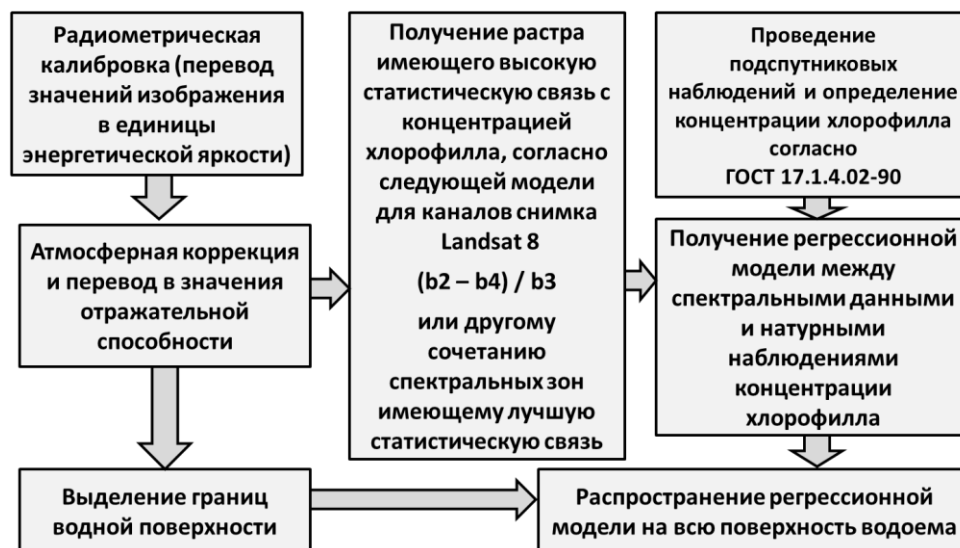


Рис. 18. Блок схема алгоритма определения концентрации хлорофилла «а» в водных массах по данным сенсора OLI спутника Landsat-8 в оптическом диапазоне

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Установлены спектральные особенности водных объектов и водной растительности позволившие разработать алгоритм для выделения береговой линии водоема и границ зон распространённости воздушно-водной растительности по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне, необходимые для повышения уровня геоэкологического мониторинга мелководных водоемов с обширными областями зарастания.

2. Выявлены комбинации спектральных каналов сенсора OLI спутника Landsat-8 имеющие существенные статистические связи с данными проведенных подспутниковых экспериментов, которые позволили разработать региональные алгоритмы для определения показателей мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а» для акватории Иваньковского водохранилища по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне. Полученные региональные алгоритмы могут использоваться как для ведения геоэкологического мониторинга, так и для ретроспективного анализа состояния водных масс Иваньковского водохранилища и других водоемов с близкими характеристиками.

3. Построенные картосхемы распределения температуры водной поверхности Иваньковского водохранилища позволили оценить потоки теплового загрязнения в месте сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС.

4. Проведено пространственное моделирование характеристик водных масс в Иваньковском водохранилище. Получены картосхемы изменения пространственного распределения мутности, цветности, концентрации хлорофилла «а», температуры поверхности воды с недоступной ранее детализацией.

5. Исследованы гидрологические (актуализированы границы водоема), гидрофизические (температура поверхностных вод, мутность), гидрохимические (цветность), гидробиологические (концентрация хлорофилла «а», биомасса фитопланктона, продуктивность, площади зарастания воздушно-водной растительности) параметры Иваньковского водохранилища. Исследованы

средние значения и пределы изменения рассматриваемых параметров для разных частей водоема. Подтверждено тепловое загрязнение Иваньковского водохранилища в районе места сброса вод с Конаковской ГРЭС с превышением температуры воды в Мошковском заливе на 3–4°C. Наиболее сильной эвтрофикации подвержен Шошинский плес (средняя глубина 1,9 м), который имеет превышение средних значений концентрации хлорофилла «а» по сравнению с другими акваториям на $4,7 \pm 1,4$ мкг/л, биомассы – на $1,6 \pm 0,2$ г/м³, первичной продукции – на $38,9 \pm 9,6$ г·С/м² в год и мутности – на $2,8 \pm 0,9$ мг/л.

6. Определен трофический статус Иваньковского водохранилища. По результатам проведенных исследований, согласно большинству используемых классификаций водоем имеет преимущественно эвтрофное состояние. Некоторые участки Волжского плеса и участки Иваньковского плеса в местах впадения притоков характеризуются мезотрофным состоянием. Трофическое состояние водоема говорит о высокой биологической продуктивности водохранилища и о накоплении в нем органических и биогенных веществ. В данной ситуации, чтобы избежать перехода в состояние гипертрофии, следует рекомендовать осуществление регулярного мониторинга состояния водоема и контроль хозяйственной деятельности в водосборном бассейне, том числе с применением данных ДЗЗ оптического диапазона.

7. Разработан комплекс методических схем проведения исследований внутренних водоемов на основе данных ДЗЗ в видимом и инфракрасном диапазонах, который предлагается использовать для ведения геоэкологического мониторинга. Предлагаемые схемы проведения исследований на основе современных технологий могут быть использованы для разработки федеральной системы мониторинга внутренних водоемов. При этом использование данных ДЗЗ в видимом и инфракрасном диапазонах может быть выделено в отдельный блок методов, позволяющих расширить возможности системы мониторинга и повышающих экономическую эффективность выполняемых задач.

Публикации автора по теме диссертации

А. Работы, включенные в реферативные базы Scopus и Web of Science:

1. **Bocharov A.V.**, Tikhomirov O.A., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Monitoring of chlorophyll in water reservoirs using satellite data // Journal of Applied Spectroscopy. – 2017. – V. 84. – № 2. – P. 291-295. doi: 10.1007/s10812-017-0466-7.

Б. В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Бочаров А.В.**, Тихомиров О.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки изменений прибрежной зоны водохранилищ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 4-4. – С. 625-632.
2. Тихомиров О.А., **Бочаров А.В.**, Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде

Иваньковского водохранилища // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2016. – № 2. – с. 230-244.

3. **Бочаров А.В.**, Тихомиров О.А. Использование корреляционного анализа данных дистанционного зондирования для оценки влияния водоемов на окружающую природную среду (на примере района Рыбинского водохранилища) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 5-5. – С. 1701-1706.

В. Патенты

1. Патент № 2750853 Российская Федерация, МПК G01C 13/00(2006.01) G01N 21/55(2014.01). Российская Федерация, Способ выделения границ водных объектов и ареалов распространения воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли : № 2020128629 : заявл. 28.08.2020 : опубл. 05.07.2021 / **Бочаров А.В.**, Межеумов И.Н., Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Тихомиров О.А., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». - 15 с. : ил.

Г. Другие публикации:

1. **Бочаров А.В.**, Шабает А.А. Оценка теплового загрязнения озер-охладителей Калининской АЭС с применением многозональной космической съемки // Вестник Тверского государственного университета. Серия «География и геоэкология». – 2013. – № 2. – С. 81-88.
2. Тихомиров О.А., **Бочаров А.В.** Подходы к исследованию физико-химических свойств воды водоемов суши на основе дистанционных методов // Геопоиск-2016. Материалы I Всероссийского конгресса молодых ученых-географов. 2016. С. 180-184.
3. Тихомиров О.А., **Бочаров А.В.** Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. – 2016. – № 1. – С. 5-11.