

Исследование динамики параметров качества воды в заливах Карского моря и прилежащем Карском шельфе на основе архивной и оперативной спутниковой информации

В. В. Кириллов¹, Н. М. Ковалевская^{1,*}, В. Е. Павлов¹, А. В. Котовщиков¹,
А. Н. Семчуков¹, С. Г. Мышляков², А. С. Скачкова², А. С. Печкин³,
Т. В. Скороспехова⁴, Л. А. Хворова⁵, Н. А. Колисниченко⁵

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

²Компания “Совзонд”, Москва, Россия

³Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

⁴Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

⁵Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

*Контактный e-mail: knm@iwer.ru

В работе использованы судовые и спутниковые данные RapidEye, Terra/ASTER и Landsat-8 (2015) и данные спутника MERIS/ENVISAT (2003–2011 гг.). Построены корреляционные соотношения (коэффициент детерминации от 0.85 до 0.94) между концентрациями оптически активных веществ и данными спутников RapidEye, Terra/ASTER и Landsat-8. Эти соотношения продемонстрировали оптическую сложность вод исследуемых акваторий и необходимость использовать данные наборов диапазонов (CoastalBlue, Green, RedEdge) для детального мониторинга фитопланктона и желтого вещества в заливах Карского моря. На основе нечеткого кластерного анализа излучений водных объектов получены классы оптически сложных поверхностных вод исследуемой акватории. С помощью нейросетевого моделирования представлена динамика концентраций оптически активных веществ за почти десятилетний период. Получены характеристики относительной устойчивости процессов, связанных с хлорофиллом, взвешенным веществом и растворенной органикой, а также пространственные детали эстуарной фронтальной зоны.

Ключевые слова: спутниковые данные, нечеткая кластеризация, фитопланктон, желтое вещество, взвешенное вещество, моделирование параметров качества воды, оптически сложные воды.

Введение

Окружающая среда в полярных регионах Земли и высокоширотные экосистемы особенно чувствительны к действию климатических и антропогенных факторов, и изменение полярных экосистем может оказывать обратное воздействие на глобальный климат.

Поэтому мировое научное сообщество уделяет пристальное внимание исследованию полярных регионов.

Оптическое дистанционное зондирование имеет высокий потенциал для получения крупномасштабных оценок гидрооптических характеристик в арктических регионах. Особенно важными являются оценка динамики происходящих изменений в структуре и функционировании прибрежных экосистем, наблюдение положения и изменчивости фронтальных зон и распространения континентального стока.

Наличие спутниковых данных и результатов стандартных алгоритмов их обработки за продолжительный период времени делает динамические оценки состояния водных экосистем весьма привлекательными. Некоторые исследователи отмечают необычайно высокий рост первичной продукции в Карском море и море Лаптевых, полученный на основе использования данных MODIS/Aqua [1]. Однако применение методов дистанционного оптического зондирования для арктических вод связано с определенными трудностями, поскольку воды арктических шельфов являются оптически сложными из-за влияния пресных вод речного стока [2]. Речной сток непосредственно влияет на оптические свойства морской воды, поэтому стандартные NASA-алгоритмы, используемые в сканерах MODIS и SeaWiFS для получения биооптических параметров морских вод, оказываются не пригодными для арктических вод. В частности, повышенное поглощение светового потока растворенной органикой в море Бофорта приводит к увеличению значений коэффициентов поглощения, соответствующих уровню олиготрофного водоема [3]. В мутных арктических водах поглощение оказывается существенным не из-за высокой концентрации хлорофилла “а” (ХЛ), а по причине наличия большого количества взвешенного вещества (ВВ) и растворенного органического вещества (РОВ). Поэтому стандартные биооптические алгоритмы неэффективны для арктических шельфов и морей, в том числе для Карского моря и моря Лаптевых [4–6]

Карское море находится под влиянием самого мощного в Арктике пресноводного континентального стока, в том числе биогенных элементов [7]. Особенностью исследуемой акватории является также уникальность экотональной экосистемы Обской губы, объединяющей особенности реки и моря, характеризующейся значительными градиентами физических, химических и биологических параметров, что было показано в результате регулярных экспедиционных исследований Института океанологии РАН, в том числе одним из самых недавних в 2014 г. [8].

Целями настоящей работы были получение пространственно-временных характеристик оптически активных веществ — ХЛ, ВВ и РОВ — в заливах Карского моря и на прилежащем мелководном Карском шельфе, а также обнаружение регулярно повторяющихся образов, соответствующих некоторому состоянию исследуемой акватории, которая предоставлена результатами обработки спутниковых данных за многолетний период.

В июле 2015 г. проведены экспедиционные исследования в заливах Карского моря, в том числе с целью изучения первично-продукционных характеристик и РОВ. Получены значения концентраций ХЛ как интегрального показателя уровня развития фитопланктона и коэффициенты поглощения РОВ на основе анализа проб воды, отобранных на различных участках Обской и Гыданской губ.

Данные in-situ были использованы в биооптических алгоритмах эвристического типа. Традиционно такие алгоритмы применялись для открытых морских и океанических вод (типа ‘case-1’), главной характеристикой которых является уровень концентрации ХЛ. Поэтому соответствующие модели опираются на данные диапазонов максимум-

ма поглощения ХЛ (Blue) и минимума поглощения ХЛ (Green). Этим моделям противопоставляются модели вод типа 'case-2', где содержание фитопланктона, ВВ и РОВ гораздо выше, чем для вод типа 'case-1'. Биооптические алгоритмы для эвтрофных вод (высокие концентрации ХЛ) и для мутных вод (высокие концентрации ВВ) основаны на данных диапазонов Red и NIR [9]. Принятое деление вод только на два типа достаточно условно и необъективно. Наше исследование показало оптическую сложность вод заливов Карского моря, не относящихся ни к одному из перечисленных типов.

Поскольку получение регулярных подспутниковых судовых измерений в этом и других арктических регионах крайне затруднено, очевидна необходимость развития полуаналитических методов для арктических акваторий. Другие важные ограничения эффективного использования стандартных подходов к обработке спутниковых данных для арктических вод связаны с облачностью, существенно лимитирующей количество доступной спутниковой информации, и низким положением Солнца, затрудняющим расчет биооптических характеристик. Поэтому Карское море и море Лаптевых включены в программу проекта CoastColor/ESA, в которой получили развитие методы оптического дистанционного зондирования арктических прибрежных вод на основе использования специальных алгоритмов [10]. В нашем исследовании также использованы эти алгоритмы, учитывающие оптические характеристики арктической океанической атмосферы и повышенный вклад ВВ и РОВ в формирование прибрежной оптической среды.

1. Исследования на основе эвристических методов обработки

1.1. Данные и методы предварительного анализа

Для анализа пространственного распределения фитопланктона по содержанию ХЛ и коэффициенту поглощения РОВ использованы данные измерений физико-химическими (экстрактными) методами. Технологическая схема включала:

- определение содержания хлорофилла в воде спектрофотометрированием ацетонового экстракта концентрата планктонных водорослей;
- обработку проб воды на содержание РОВ на основе измерений на двухлучевом спектрофотометре SPECORD 200 Analytik Jena и вычислений с помощью программных комплексов Winaspect, CDOM.

С учетом изменчивости процессов и возможного ветрового воздействия в исследуемой акватории результаты измерений были представлены с использованием батиметрических карт (рис. 1), созданных в среде моделирования гидрофизических и экологических процессов Delft3D [11].

1.2. Обработка спутниковых данных

Расчет концентраций хлорофилла и коэффициентов поглощения РОВ проводился на основе спутниковых данных высокого разрешения и эвристического моделирования. Для исследования использовались следующие спутниковые данные: RapidEye (5 м: 04.08.2015), Terra/ASTER (15 м: 07.07.2015, 16.07.2015, 04.08.2015), Landsat-8 (30 м: 31.07.2015).

Самой эффективной эвристической моделью для определения концентраций ХЛ с использованием in-situ-измерений в исследуемой акватории оказалась модель, осно-

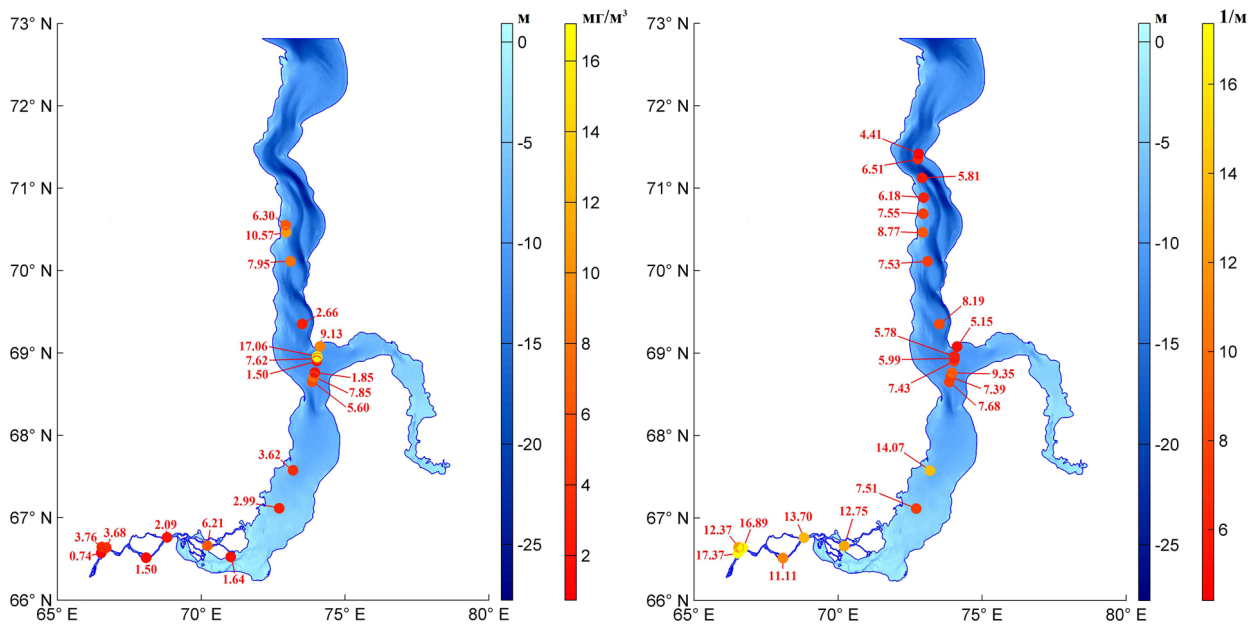


Рис. 1. Представление концентраций ХЛ (слева) и коэффициентов поглощения РОВ (справа) с использованием батиметрических карт

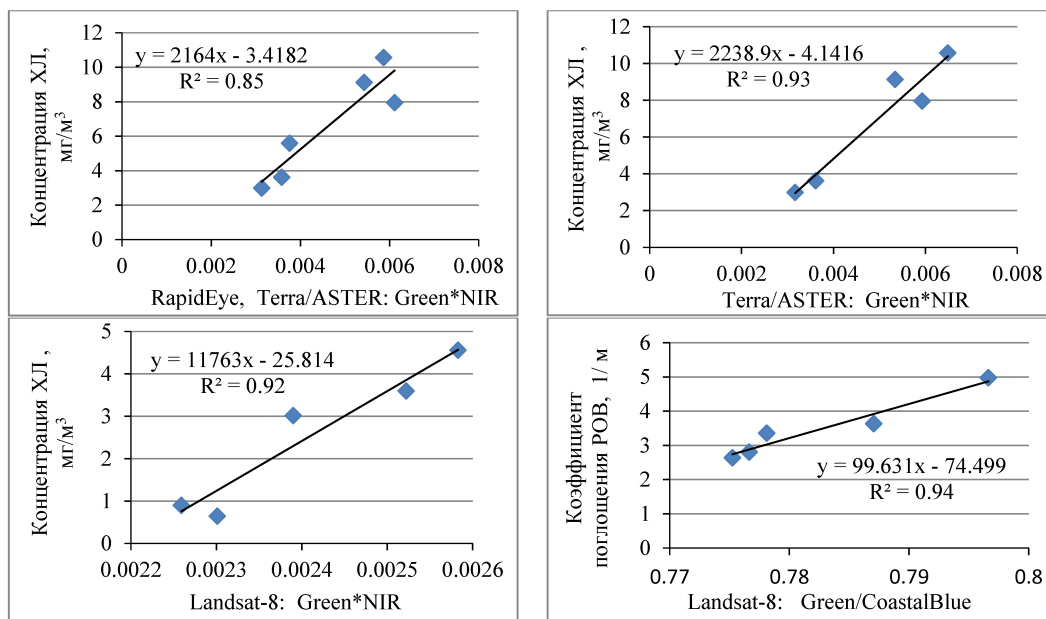


Рис. 2. Регрессионные зависимости данных in-situ и спутниковых наблюдений

Значения коэффициентов корреляций

Данные	Модель для определения концентрации ХЛ		
	Green*NIR	Red*NIR	Blue*Green
Landsat-8	0.95	0.82	0.55
Terra/ASTER	0.96	0.92	Blue отсутствует

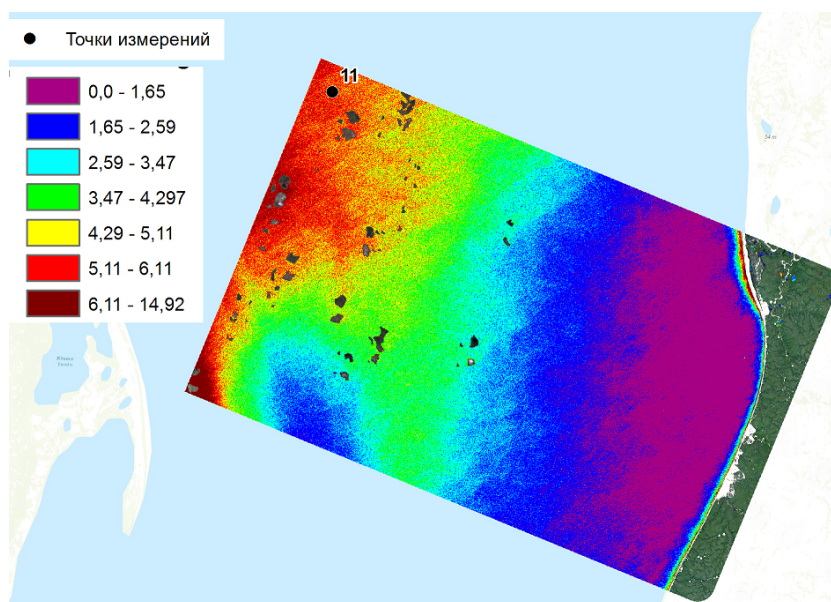


Рис. 3. Распределение концентрации ХЛ ($\text{мг}/\text{м}^3$) по данным спутника RapidEye (04.08.2015)

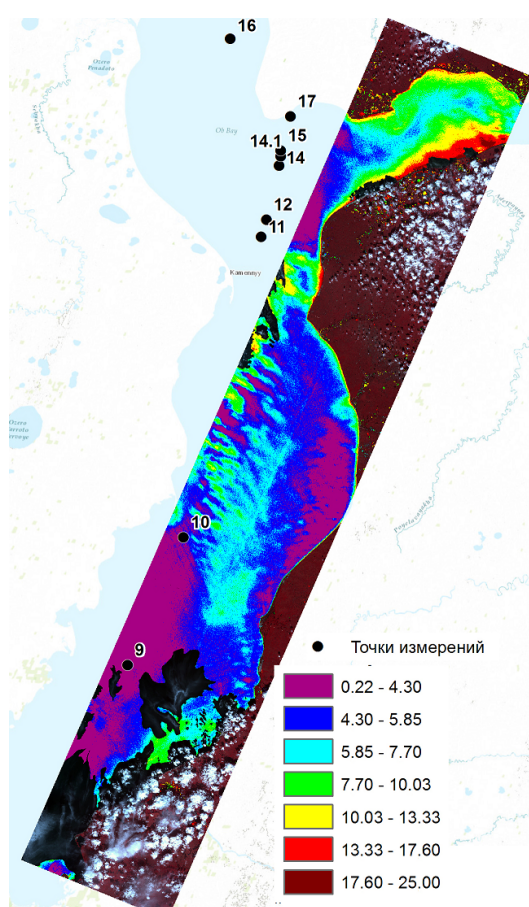


Рис. 4. Распределение концентрации ХЛ ($\text{мг}/\text{м}^3$) по данным спутника Terra/ASTER (16.07.2015)

ванная на данных диапазонов Green и NIR (рис. 2–5). Поскольку на снимок RapidEye попала только одна точка судовых измерений (см. рис. 3), для построения регрессионных зависимостей были добавлены точки, представленные на снимках спутника Terra/ASTER, у которого значимые для моделей диапазоны совпадают с диапазонами спутника RapidEye.

В таблице приведены значения коэффициентов корреляции в сравнении с традиционными эвристическими моделями, одновременно использующими один из диапазонов-максимумов (Red, Blue) и один из диапазонов-минимумов (NIR, Green) поглощения хлорофилла А для данных Landsat-8 и Terra/ASTER.

Модели для оценки коэффициента поглощения РОВ на основе данных Landsat-8 показали эффективность применения диапазона CoastalBlue (см. рис. 2, 6), который соответствует максимуму поглощения РОВ [12].

Полученные регрессионные зависимости показали необходимость учитывать одновременно данные следующих диапазонов: для концентраций ХЛ — Green и RedEdge (или Red), для коэффициента поглощения РОВ — CoastalBlue и Green.

В результате пространственного анализа установлены значительные отличия различных частей акватории по концентрации ХЛ, что согласуется с ретроспективными натурными данными по хлорофиллу [13], а также с результатами за 2015 г. по чис-

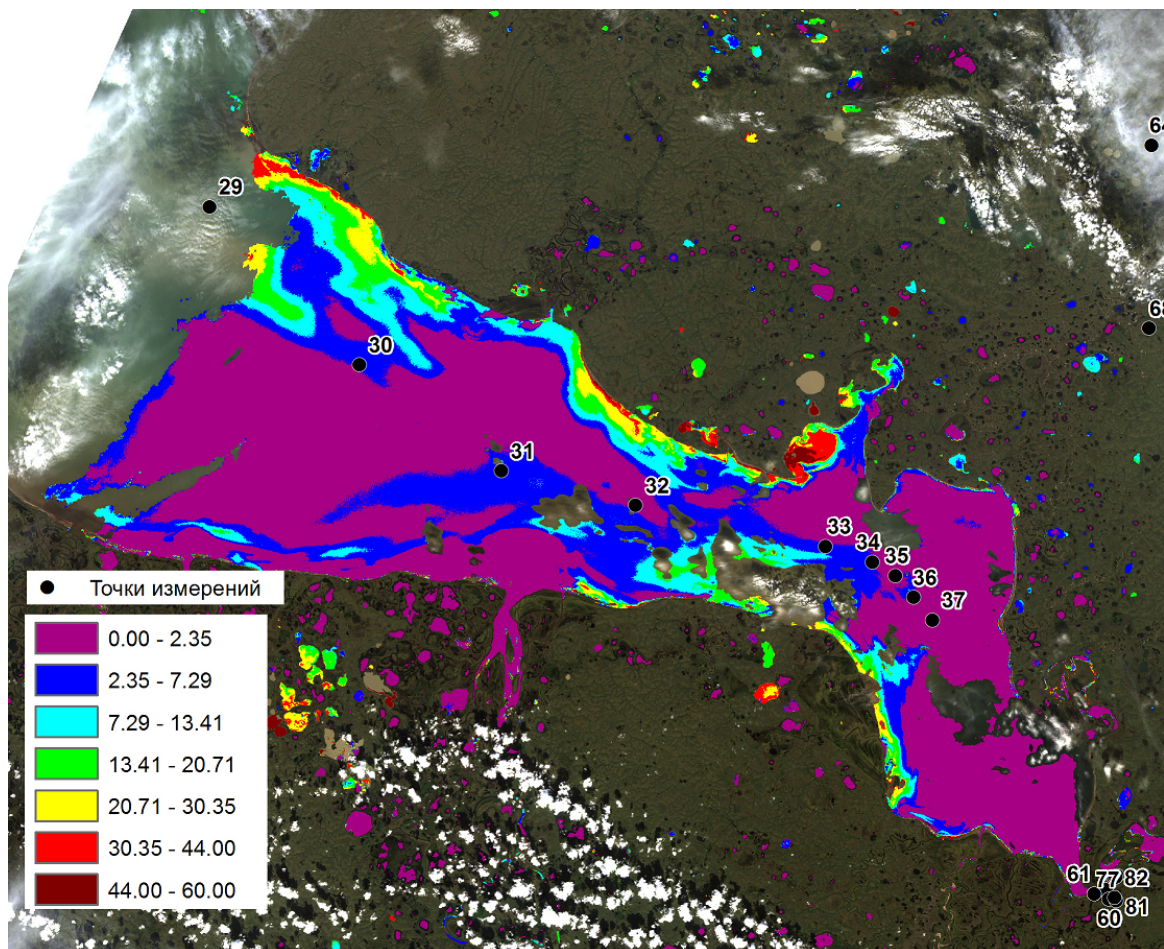


Рис. 5. Распределение концентрации ХЛ (мг/м³) по данным спутника Landsat-8 (31.07.2015)

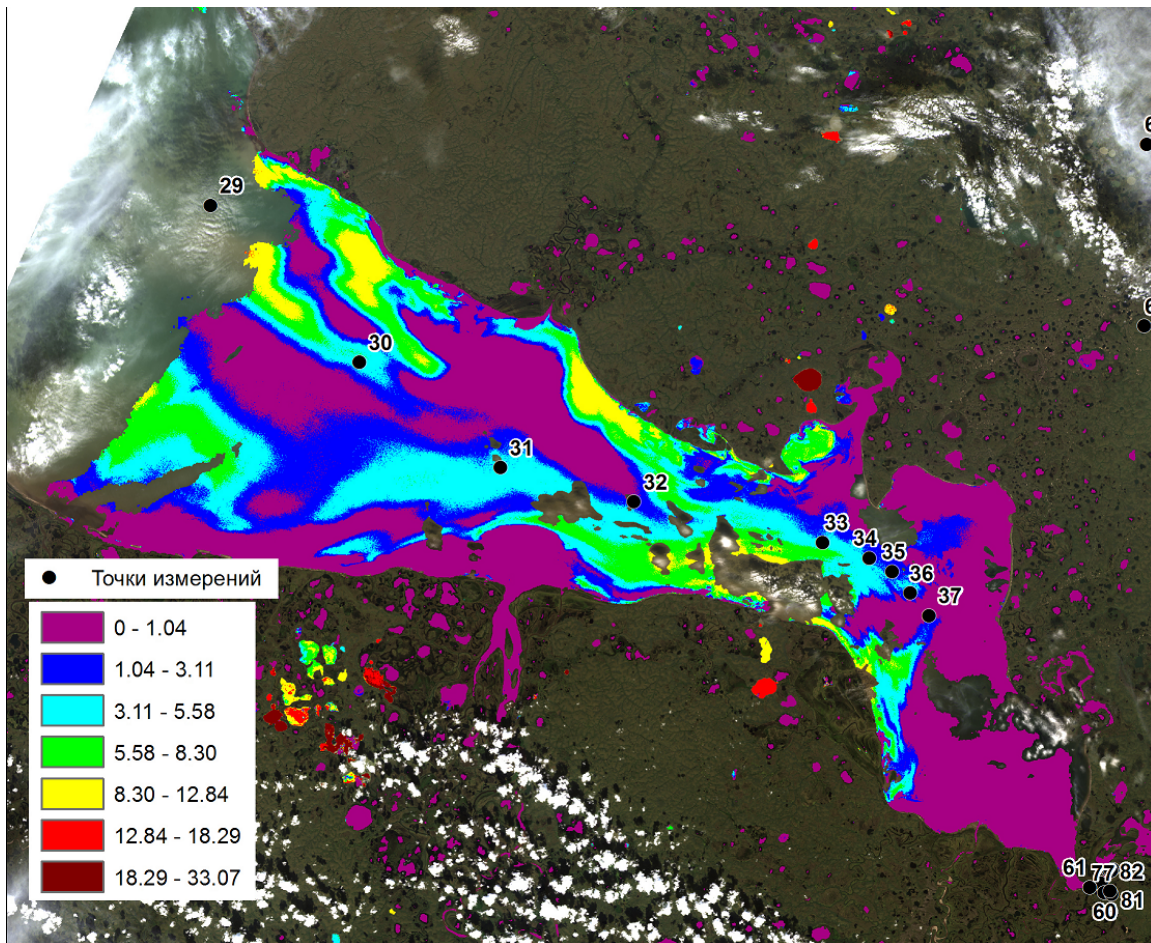


Рис. 6. Распределение коэффициента поглощения РОВ (1/м) по данным спутника Landsat-8

ленности и биомассе водорослей фитопланктона [14]. Прослеживается и отмеченная ранее [7] тенденция уменьшения количества фитопланктона по мере продвижения от дельты реки Оби к выходу из губы в Карское море на градиенте солености.

2. Исследования на основе полуаналитических методов обработки

2.1. Оптическая классификация на основе нечеткой кластеризации

Традиционные алгоритмы классификации настроены на определенные оптические объекты (с некоторыми ограниченными диапазонами изменения параметров качества воды и внутренними оптическими свойствами — коэффициентами поглощения и рассеяния). Но в реальной действительности внутренние оптические свойства и параметры качества воды отличаются крайним разнообразием. Поскольку космические сенсоры принимают все разнообразие видимых оптических характеристик, необходимы специальные инструменты предварительного анализа снимков оптически сложных вод. Одним из таких инструментов является классификация яркостного пространства признаков на основе нечеткого кластерного анализа излучений водных объектов [9, 15]. Каждому кластеру соответствует некоторая характеристическая кривая в яркостном признаковом прост-

ранстве. При этом один и тот же элемент раstra i ($i = 1, \dots, N$) может принадлежать нескольким (или всем) кластерам j ($j = 1, \dots, C$). Используется метод нечеткой кластеризации C -средних, оптимальное число кластеров определяется методом иерархической кластеризации для $2 \leq C \leq 20$. Такая нечеткость кластеризации формализуется через матрицу принадлежности $U = (u_{ij})$, состоящую из уровней принадлежности u_{ij} :

$$\sum_{j=1}^C u_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N.$$

На рис. 7 представлен результат оптической классификации, когда для каждого элемента выбран один класс (кластер), соответствующий максимальному уровню принадлежности. На рисунке практически отсутствуют классы 1–5 с доминирующим преобладанием фитопланктона. Высокая мутность большей части исследуемой акватории соответствует 6-, 7- и 8-му классам оптической классификации. При этом основная часть Карского моря отличается низкой биопродуктивностью, поэтому в районах, не подверженных непосредственному влиянию материкового стока, воды оказываются весьма прозрачными.

Прозрачность воды относится к числу факторов, определяющих или лимитирующих продукционную активность фитопланктона. Повышение мутности вод в прибрежных зонах, обусловленное эоловым переносом взвесей и взмучиванием донных осадков, связано с выносом взвесей речным стоком. Общей отличительной чертой оптических характеристик этих вод является влияние распространения речных вод, биологических процессов и гравитационного осаждения взвеси. Однако большие градиенты ВВ и РОВ в исследуемой акватории приводят к значительным контрастам прозрачности, связанным с уровнем мутности в устьях Обской, Тазовской и Гыданской губ. В результате выноса большого количества ВВ и РОВ с речными водами наблюдаются большие контрасты первой оптической глубины (0.1–11 м) и мутности (0.4–89.4 FNU), что также представлено на рис. 7.

2.2. Пространственно-временная изменчивость концентраций ХЛ

Концентрация ХЛ — важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продуктивности океанов и морей, чувствительный индикатор изменений, происходящих с морскими экосистемами. Для изучения продукционных характеристик в Карском море и отдельных его заливах проведено несколько экспедиций (1981, 1993, 2007, 2010, 2015 гг.), в результате которых получены точечные данные на нескольких доступных разрезах, преимущественно в осенний период. Оказалось, что Обская губа отличается самой высокой биологической продуктивностью во всем Карском регионе [4, 5].

Результаты моделирования MERIS-данных за 2003–2011 гг. на основе нейросетевых алгоритмов [16], представленные на рис. 8 и 11, позволили:

- подтвердить предполагаемую зональность распределения концентраций ХЛ, очевидно связанную с градиентом солености и концентраций биогенных элементов [7], констатируя наличие опресненной и фронтальной зон, а также зоны мелководного шельфа;
- представить устойчивые структуры полей распределения концентраций ХЛ в летний период;

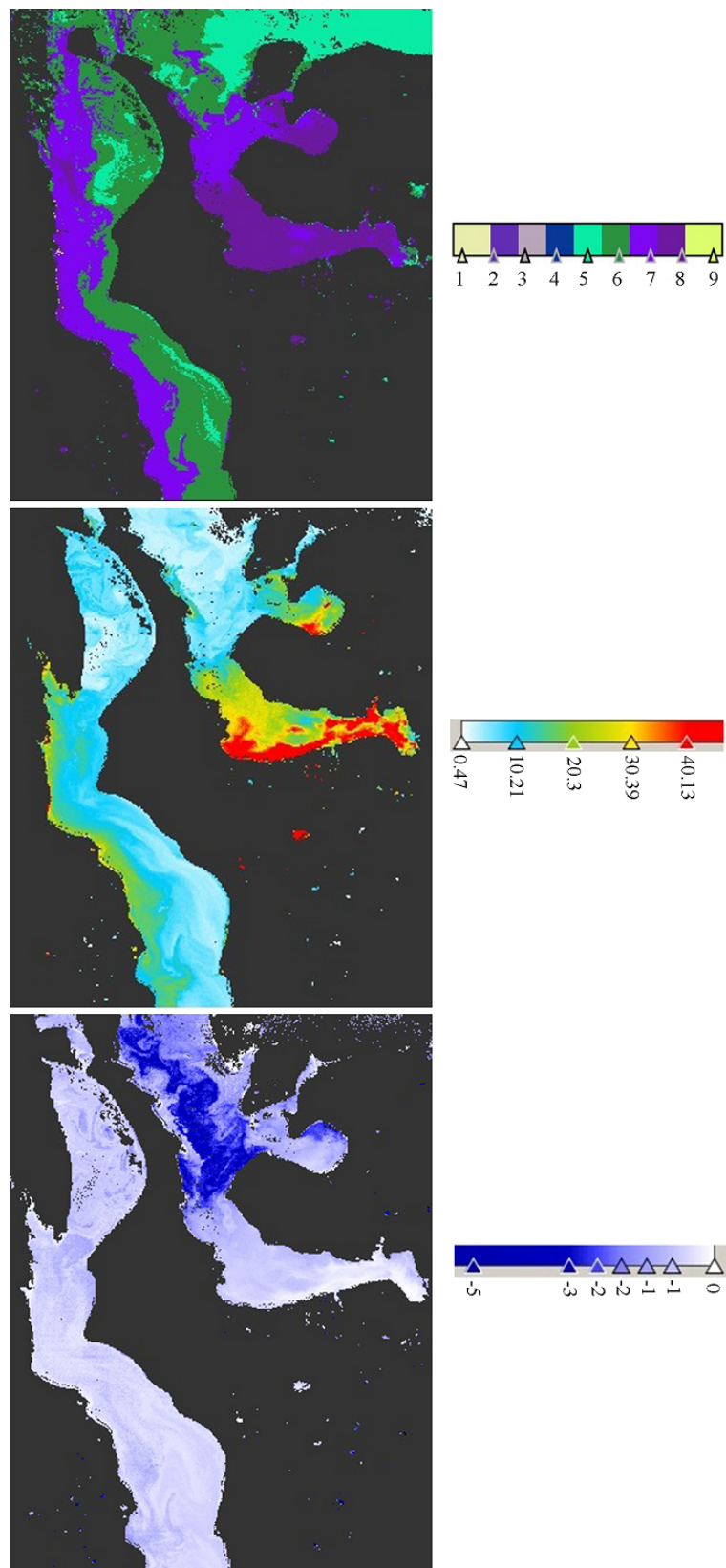


Рис. 7. Оптические классы (1–9), мутность (FNU), первая оптическая глубина (м): 15.07.2011

- показать некоторый рост концентраций ХЛ в Обском эстуарии и прилежащем Карском шельфе.

Опресненная зона характеризуется самым высоким содержанием ХЛ, что может быть связано с массовым выносом фитопланктона с речными водами, его видовой спецификой и высокой мутностью. Максимальные модельные концентрации ХЛ в опресненной зоне соответствуют области слияния вод Обской и Тазовской губ, которая получает преобладающую часть загрязняющих веществ в связи с развитием на ее водосборе нефтегазового комплекса. Содержание ХЛ во фронтальной зоне значительно ниже, чем в речной области. Но структура полей концентраций ХЛ в этой зоне может характеризоваться крайней сложностью при динамическом изменении размеров самой фронтальной зоны [8].

2.3. Пространственно-временная изменчивость концентраций ВВ и коэффициентов поглощения РОВ

Исследование ВВ разнообразного происхождения представляет существенный интерес для изучения процессов современного осадконакопления. Основные характеристики взвеси формируются в результате жизнедеятельности морских организмов и поступления минерального вещества [17].

Максимальные значения модельных концентраций ВВ наблюдаются в устье Обской, Тазовской и Гыданской губ. Для каждого из этих заливов существует свой рубеж, или фронтальная зона (см. рис. 9), где скорость потока речных вод замедляется и основная масса взвешенных частиц, особенно ее крупные фракции, выпадает на дно [17]. За пределами этих фронтальных зон поля концентрации взвеси принимают существенно более низкие значения.

Значения коэффициента поглощения РОВ по всей акватории распределены неравномерно, что соответствует результатам проводимых ранее исследований [18]. Максимальные значения коэффициента поглощения РОВ отмечены на участках вод основного потока поступающей речной воды с обского, тазовского и гыданского водосборов. При этом основные особенности сосредоточены в районе смешения обских и тазовских вод. Район впадения тазовских вод характеризуется наиболее низкими значениями коэффициента поглощения. Эти величины РОВ в зоне перемешивания у западного берега представлены на рис. 10. Они простираются в северном направлении на несколько километров. При этом более холодные и более плотные воды Тазовской губы вдоль правого берега врезаются в относительно теплый обской поток, создавая область возмущения.

Исследование динамики модельных значений (2003–2011 гг.) показало, что концентрации ВВ (см. рис. 11) и коэффициенты поглощения РОВ имеют одинаковую тенденцию к некоторому возрастанию в устье и средней части Обской губы, а также в Гыданской губе.

Выводы

В работе продемонстрированы возможности применения биооптических методов дистанционного зондирования в арктической акватории к спутниковым данным за более чем десятилетний период времени. Несмотря на трудности получения качественной спутниковой информации в арктическом регионе, получены регулярные временные ряды MERIS-данных (2003–2011 гг.). Они обработаны в открытой программной среде BEAM-VIASAT/ESA на основе метода нечеткой кластеризации в яркостном прост-

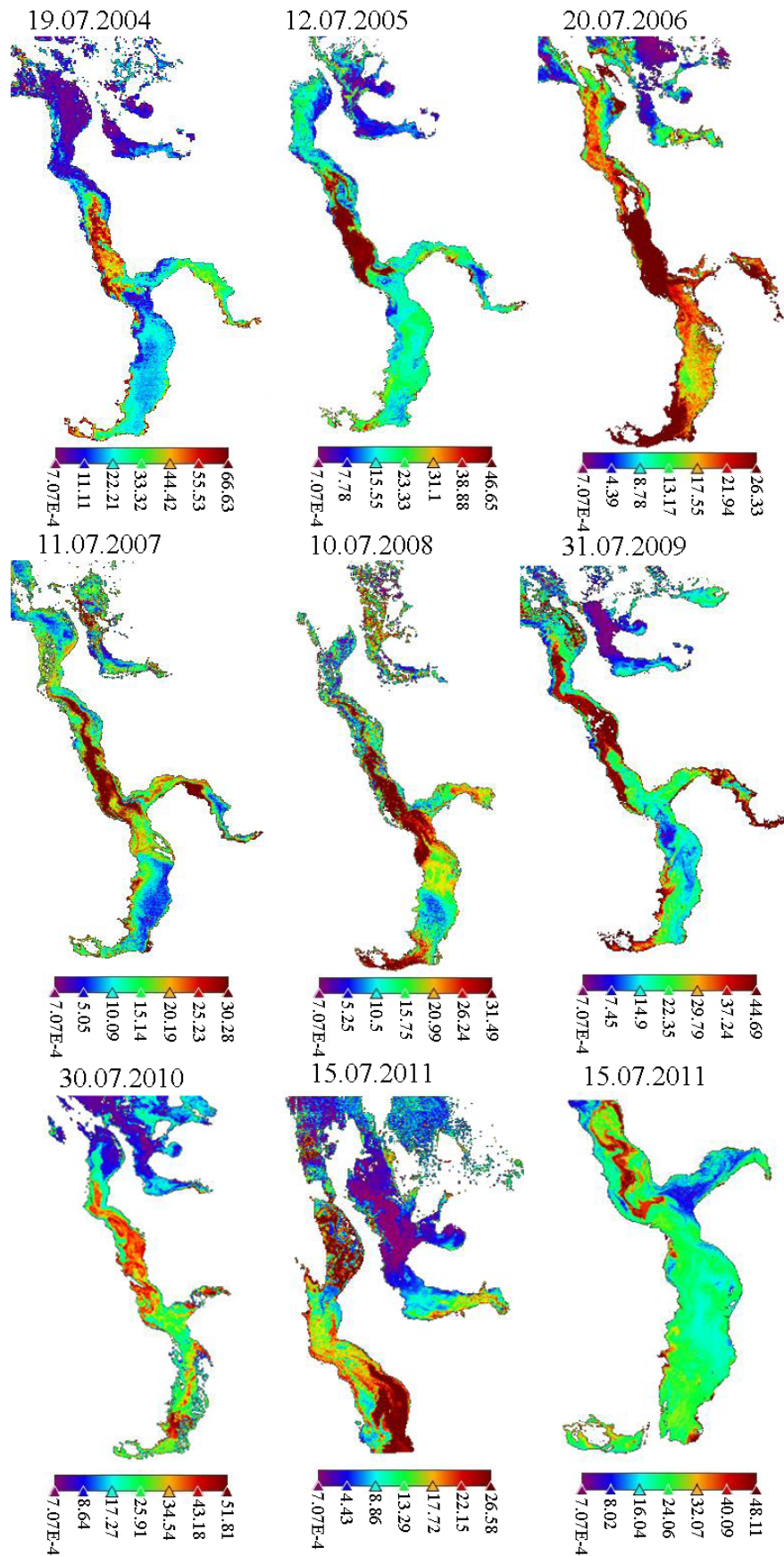
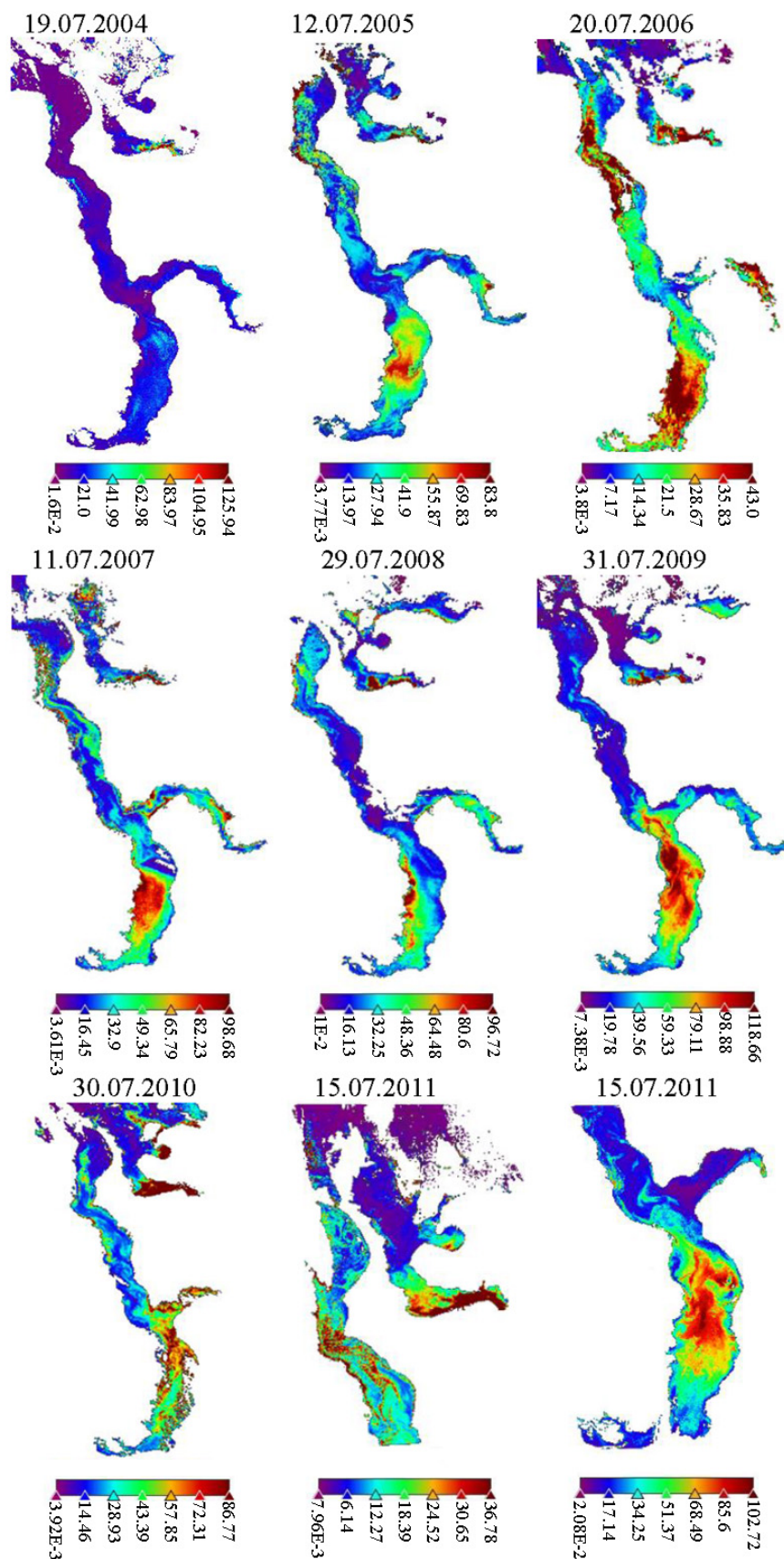


Рис. 8. Концентрации ХЛ в $\text{мг}/\text{м}^3$ (2004–2011 гг.)

Рис. 9. Концентрации ВВ в $\text{г}/\text{м}^3$ (2004–2011 гг.)

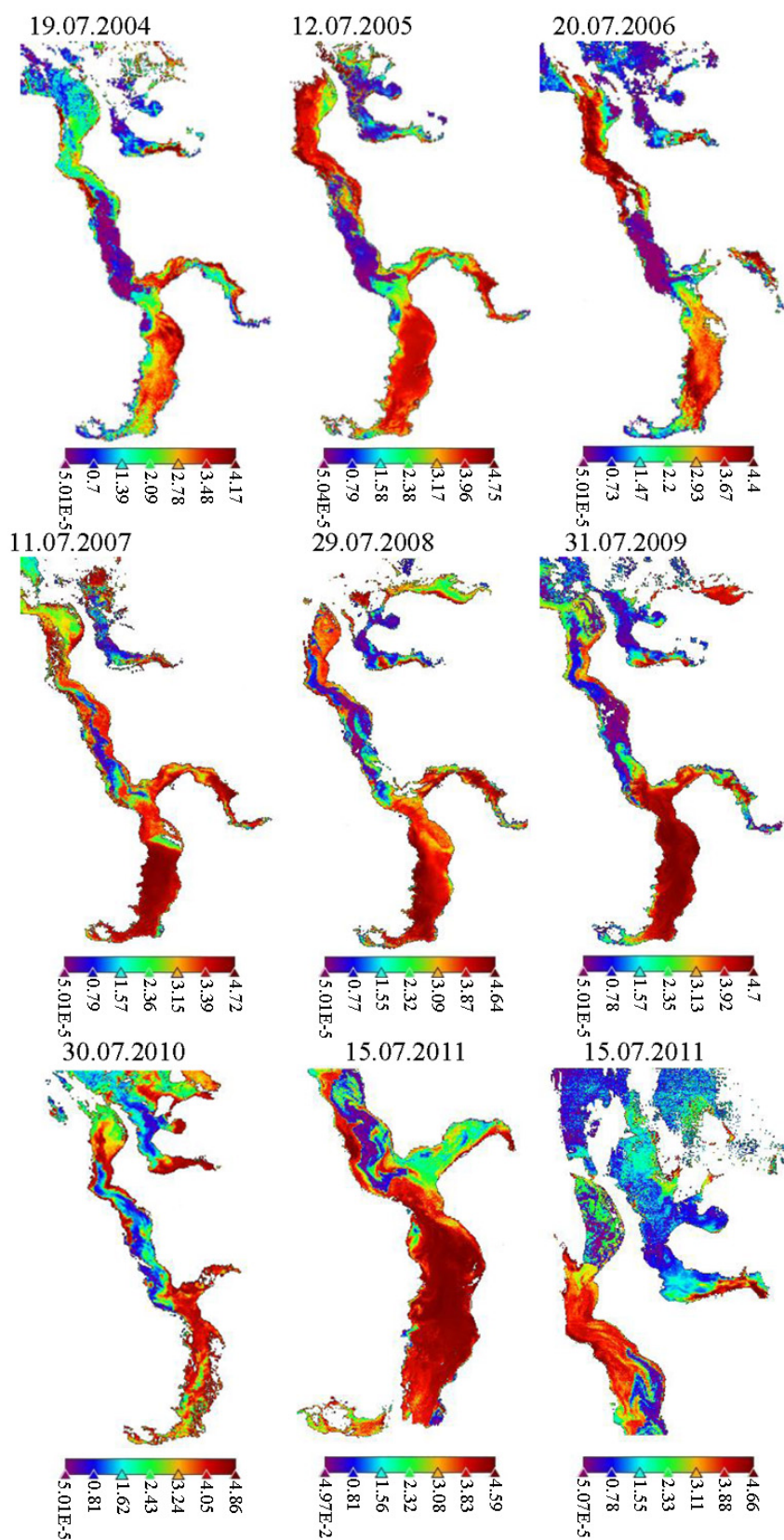


Рис. 10. Коэффициенты поглощения РОВ в 1/м (2004–2011 гг.)

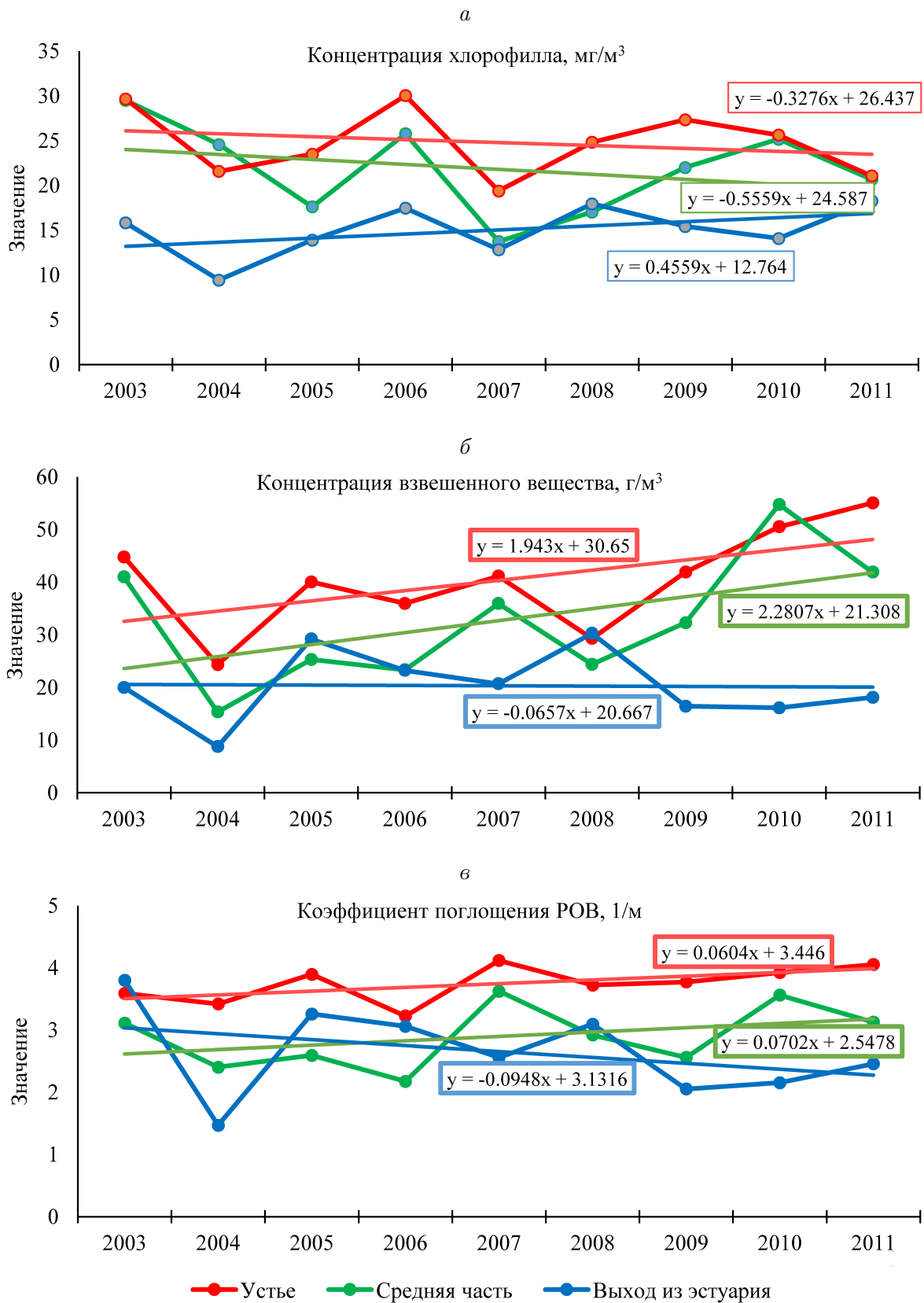


Рис. 11. Средние значения концентрации ХЛ (*a*), концентрации ВВ (*б*) и коэффициента поглощения РОВ (*в*) в устье Обской губы, средней части и выходе из эстуария

ранстве признаков для получения распределения основных оптических классов и на основе нейросетевых алгоритмов для оптически сложных поверхностных вод. Проведенные исследования и обработанная к настоящему времени часть материалов позволяют говорить о первых результатах.

- Получены оптические классы вод и представлена динамика изменений модельных значений оптически активных веществ, а также первичных гидрооптических характеристик за почти десятилетний период.
- Получены дополнения к схеме летней циркуляции вод в Обском эстуарии и прилегающем шельфе, которые представляют пространственные детали и уточнения для опубликованных ранее данных.
- Представлены пространственные детали структуры эстуарной фронтальной зоны в области смешения морских и речных вод в Обской губе. Эта зона связана с выклиниванием пресной воды к поверхности и проникновением соленой воды в глубь Обской губы в придонных слоях, а также является границей в распределении высоких “речных” концентраций биогенных элементов.
- Выявлены детали межгодовой изменчивости ХЛ, ВВ и РОВ в отдельных частях Обской губы (устье, средней части, эстуарии и прилегающем шельфе) и Гыданской губе.

Дополнительного исследования требует тот факт, что распределения концентраций ХЛ и ВВ аппроксимируются логнормальной функцией, а функции распределения РОВ носят бимодальный характер. Но, несмотря на большую изменчивость процессов в изучаемом регионе, получены характеристики их относительной устойчивости, связанные с оптически активными веществами. Можно предполагать, что в соответствующий период эта акватория справлялась с антропогенным и климатическим воздействием.

Исследования, проведенные на основе использования *in-situ*-данных Обской и Гыданской губ (2015 г.) и эвристического моделирования, продемонстрировали оптическую сложность вод заливов Карского моря. Если в прибрежных водах с невысоким содержанием ХЛ спектральные диапазоны Green и Blue являются наиболее чувствительными к изменениям концентраций ХЛ, а в мутных и/или эвтрофных водах диапазоны Red и NIR становятся более значимыми, то для мониторинга исследуемой акватории необходимо использовать данные наборов диапазонов (Green, RedEdge)_{ХЛ}, (CoastalBlue, Green)_{РОВ}.

Особый интерес для будущего исследования представляет тот факт, что структуры полей фитопланктона и желтого вещества во фронтальных зонах характеризуются особой сложностью процессов и динамикой размеров фронтальных зон. При этом содержание ХЛ во фронтальной зоне Обской губы значительно ниже, чем в ее речной части. Поскольку факторы, влияющие на распределение фитопланктона, определяются вдоль градиента солености, следующим шагом исследования будет сопоставление деталей полей концентраций ХЛ с результатами математического моделирования солевого режима с учетом интрузии речных вод, которое будет выполнено с помощью программного комплекса Delft3D.

Полученные результаты позволяют определить условия эффективного оперативного мониторинга водных экосистем региона при изменении климата и увеличении антропогенной нагрузки вследствие использования природных ресурсов Гыданского полуострова и дноуглубительных работ для обеспечения круглогодичного судоходства в районах портов Сабетга и Каменный Мыс. Следует также отметить, что исследуемая территория подвергается активному воздействию: с пресноводным стоком на Карский шельф

выносятся более 150 млн тонн аллохтонного вещества, включая широкий спектр загрязнений; в регионе в сильной степени выражена характерная для Арктики в последние десятилетия деградация летнего ледового покрова; на шельфе и в прибрежной зоне моря разведаны огромные запасы газоконденсата и нефти. Крупнейшие радиоактивные могильники в заливах восточного берега Новой Земли и Новоземельской впадине делают Карское море сосредоточением значительных накопленных экологических рисков.

Все это определяет крайнюю важность получения регулярных спутниковых наблюдений и развития представленных методов с целью оптимизации управления сохранением и использованием природных ресурсов, а также эффективного контроля качества вод в арктических акваториях.

Список литературы / References

- [1] **Frey, K.E., Comiso, J.C., Cooper, L.W. et al.** Arctic ocean primary productivity. Arctic Report Card 2014. Available at: <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard> (accessed 23.09.2017).
- [2] Remote sensing of Ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. IOCCG Report Number 3, 2000. Available at: www.ioccg.org/reports/report3.pdf
- [3] **Antoine, D., Hooker, S.B., Bélanger, S. et al.** Apparent optical properties of the Canadian Beaufort Sea. Pt 1: Observational overview and water column relationships // *Biogeosciences*. 2013. No. 10(7). P. 4493–4509.
- [4] **Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Артемьев В.А., Шеберстов С.В.** Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 716–729.
Burenkov, V.I., Goldin, Yu.A., Artem'ev, V.A., Sheberstov, S.V. Optical characteristics of the Kara Sea derived from shipborne and satellite data // *Oceanology*. 2010. Vol. 50, No. 5. P. 675–687.
- [5] **Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др.** Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 21–31.
Kuznetsova, O.A., Kopelevich, O.V., Sheberstov, S.V. et al. Estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea from data of MODIS-Aqua satellite scanner // *Earth Observation and Remote Sensing*. 2013. No. 5. P. 21–31. (In Russ.)
- [6] **Heim, B., Abramova, E., Doerffer, R. et al.** Ocean colour remote sensing in the southern Laptev Sea: evaluation and applications // *Biogeosciences*. 2014. No. 11. P. 4191–4210. DOI: 10.5194/bg-11-4191-2014.
- [7] **Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М.** Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в обском эстуарии и на прилежащем карском шельфе // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 785–800.
Sukhanova, I.N., Flint, M.V., Mosharov, S.A., Sergeeva, V.M. Structure of the phytoplankton communities and primary production in the Ob River estuary and over the adjacent Kara Sea shelf // *Oceanology*. 2010. Vol. 50, No. 5. P. 743–858.
- [8] **Флинт М.В., Поярков С.Г.** Комплексные исследования экосистемы Карского моря (128-й рейс науч.-исслед. судна “Профессор Штокман”) // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 4. С. 723–726. DOI: 10.7868/S0030157415040073.
Flint, M.V., Poyarkov, S.G. Complex studies of the Kara Sea ecosystem (128th voyage of the research ship “Professor Shtokman”) // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, No. 4. P. 723–726. (In Russ.)

- [9] **Moore, T.S., Dowell, M.D., Bradt, S., Verdu, A.R.** An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 97–111. DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.021.
- [10] **Ruddick, K., Brockmann, C., Doerffer, R. et al.** The Coast colour project regional algorithm round robin exercise. Available at: <http://www.coastcolour.org/publications/7858-6.pdf>
- [11] Deltares, 2014. Delft3D-FLOW User Manual. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Version: 3.15. SVN Revision: 55922, 1 June 2018. Available at: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf
- [12] **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. Tendencies of eutrophication of the south-eastern part of Baltic Sea by satellite data: Dissertation for degree of candidate of geographical sciences. Kaliningrad: АО ИО РАН, 2014. 142 p. (In Russ.)
- [13] **Гаевский Н.А., Семенова Л.А., Матковский А.К.** Трофический статус вод экосистемы Обско-Тазовской устьевой области по показателям фитопланктона // *Вестн. экологии лесоведения и ландшафтоведения* 2009. № 10. С. 170–179.
Gayevskiy, N.A., Semenova, L.A., Matkovskiy, A.K. Trophic status of waters in the ecosystem of the Ob and Taz estuarine area according to indexes of phytoplankton // *Bullet. of the Ecology of Forest Sci. and Landscape Studies*. 2009. No. 10. P. 170–179. (In Russ.)
- [14] **Митрофанова Е.Ю.** Фитопланктон нижней Оби, Обской и Гыданской губ летом 2015 г. // *Изв. Алт. от-ния Русского географ. общества*. 2016. №. 3(42). С. 61–71.
Mitrofanova, E.Yu. Phytoplankton of lower Ob, gulf of Ob and Khatmyer Bay in summer of 2015 // *Bullet. of the Altay Branch of the Russ. Geograph. Soc.* 2016. No. 3 (42). P. 61–71. (In Russ.)
- [15] **Ерлов Н.Г.** Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
Jerlov, N.G. Marine optics. 2nd ed. New York: Elsevier Sci. Ltd, 1976. 231 p.
- [16] **Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Павлов В.Е. и др.** Использование спутниковой информации для оценок качества воды и батиметрических характеристик Новосибирского водохранилища // *Вычисл. технологии*. 2016. Т. 21, №. 1. С. 92–106.
Kovalevskaya, N.M., Kirillov, V.V., Pavlov, V.E. et al. Use of satellite data for water quality parameters retrieval and bathymetry derivation for Novosibirsk Reservoir // *Comput. Technologies*. 2016. Vol. 21, No. 1. P. 92–106. (In Russ.)
- [17] **Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д.** Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2010. Т. 50, №. 5. С. 842–849.
Burenkov, V.I., Goldin, Yu.A., Kravchishina, M.D. Distribution of the suspended matter concentration in the Kara Sea in September 2007 based on ship and satellite data // *Oceanology*. 2010. Vol. 50, No. 5. P. 798–805.
- [18] **Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И.** Пространственно-временная изменчивость органического вещества и скоростей его трансформации в Обской губе // *Океанология*. 2013. Т. 53, №. 2. С. 175–191.
Agatova, A.I., Lapina, N.M., Torgunova, N.I. Spatiotemporal variability of the organic matter and the rates of its transformation in the Ob Inlet // *Oceanology*. 2013. Vol. 53, No. 2. P. 152–168.

*Поступила в редакцию 22 января 2018 г.,
с доработки — 13 апреля 2018 г.*

Investigation for dynamics of water quality parameters in the Kara Sea and the adjacent Kara Sea shelf on the basis of archive and time-sensitive satellite observations

KIRILLOV, VLADIMIR V.¹, KOVALEVSKAYA, NELLEY M.^{1,*}, PAVLOV, VLADIMIR E.¹, KOTOVSHCHIKOV, ANTON V.¹, SEMCHUKOV, ALEKSANDER N.¹, MYSHLYAKOV, SERGEY G.², SKACHKOVA, ALEKSANDRA S.², PECHKIN, ALEKSANDR S.³, SKOROSPEKHOVA, TATIANA V.⁴, KHVOROVA, LYUBOV A.⁵, KOLISNICHENKO, NADEZHDA A.⁵

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

²Sovzond Company Ltd., Moscow, 115563, Russia

³Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, 629008, Russia

⁴Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, 199397, Russia

⁵Altai State University, Barnaul, 656049, Russia

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

Ship and time-sensitive satellite (RapidEye, Terra/ASTER, Landsat-8) data of 2015 are used for analysis. Depth Delft3D-maps is a tool for preliminary analysis. Statistical relationships (determination coefficient changes from 0.92 to 0.99) between optically active substance concentrations and apparent optical properties are revealed. The relationships show optical complexity of the studied area waters and necessity to use the bands (CoastalBlue, Green, RedEdge) for detailed monitoring of phytoplankton and yellow matter in the Kara Sea bays.

Fuzzy cluster analysis of water reflectance was applied for MERIS/ENVISAT data (2003–2011). On this basis, classes of optically complex surface waters of the study area were obtained. By the help of neural network modelling, the dynamics of concentrations of optically active constituents is presented for almost a decade. Characteristics of the relative stability of processes associated with chlorophyll, suspended matter and dissolved organic matter as well as spatial details of the estuary front zone were found. Regular satellite data of high resolution and development of the presented methods are necessary for further monitoring of arctic water quality.

Keywords: satellite data, fuzzy clustering, phytoplankton, yellow matter, total suspended matter, modelling of water quality parameter, optically complex waters.

Received 22 January 2018

Received in revised form 13 April 2018