

# INVESTIGATION OF WATER QUALITY PARAMETERS DYNAMICS IN THE GULF OF OB AND THE ADJACENT KARA SEA SHELF ON THE BASIS OF MULTI-YEAR SATELLITE OBSERVATIONS

*Nelly M. Kovalevskaya<sup>1</sup>, Vladimir V. Kirillov<sup>1</sup>, Vladimir E. Pavlov<sup>1</sup>, Sergey G. Myshlyakov<sup>2</sup>, Aleksandra S. Skachkova<sup>2</sup>, Lubov A. Khvorova<sup>3</sup>, Nadezhda A. Kolisnichenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

<sup>2</sup>Sovzond Company Ltd., Moscow, Russia

<sup>3</sup>Altai State University, Barnaul, Russia

## **Abstract**

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 modeling, 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.

*Keywords: optically complex waters, satellite data, fuzzy clustering, modeling of water quality parameters*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ОБСКОЙ ГУБЕ И ПРИЛЕЖАЮЩЕМ КАРСКОМ ШЕЛЬФЕ НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ковалевская Н.М.<sup>(1)</sup>, Кириллов В.В.<sup>(1)</sup>, Павлов В.Е.<sup>(1)</sup>, Мышляков С.Г.<sup>(2)</sup>, Скачкова А.С.<sup>(2)</sup>,  
Хворова Л.А.<sup>(3)</sup>, Колисниченко Н.А.<sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

<sup>2</sup> СОВЗОНД, Москва

<sup>3</sup> Алтайский государственный университет, Барнаул

В применении к регулярным временным данным спутника MERIS/ENVISAT (2003-2011) был использован нечеткий кластерный анализ излучений водных объектов. На этой основе 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:* оптически сложные воды, спутниковые данные, нечеткая кластеризация, моделирование параметров качества воды.

**Введение.** Процессы, происходящие в полярных регионах Земли, в настоящее время привлекают самое пристальное внимание исследователей. Это определяется тем, что полярная среда и высокоширотные экосистемы особенно чувствительны к действию климатических и антропогенных факторов, и изменение полярных экосистем может оказывать обратное воздействие на климат Земли в целом. Поэтому мировое научное сообщество уделяет особо 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 речных стоков.

Наличие спутниковых данных и результатов стандартных алгоритмов их обработки за продолжительный период времени делает динамические оценки состояния водных экосистем весьма привлекательными. Некоторые исследования отмечают необычайно высокий рост первичной продукции в Карском море и море Лаптевых, полученный на основе использования данных MODIS/Aqua [1]. Однако использование 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 непригодными для арктических вод. В частности, повышенное поглощения светового потока растворенной органикой в море Бофорта приводит к увеличению значений величин коэффициентов поглощения, соответствующих уровню олиготрофного водоема [3]. В мутных арктических водах поглощение оказывается существенным не из-за высокой концентрации ХЛ, а по причине наличия большого количества ВВ и растворенной органики. Поэтому стандартные биооптические алгоритмы неэффективны для арктических шельфов и морей, в том числе для Карского моря и моря Лаптевых [4, 5, 6].

Карское море находится под влиянием самого мощного в Арктике пресноводного стока, в том числе биогенных элементов [7]. Особенностью исследуемой акватории является также уникальность Обской губы, объединяющей особенности реки и моря, что обуславливает сложный комплекс гидробиологических процессов.

В биооптических исследованиях, выполненных ранее в Карском море, использовались эвристические модели (региональные алгоритмы) для оценки параметров качества воды на основе спектральных распределений первичных гидрооптических характеристик [4, 5]. К сожалению, количество судовых спектрометрических измерений оказывается крайне малым [5], поэтому очевидна необходимость развития полуаналитических методов для арктических территорий. 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 были включены в программу проекта CoastColor/ESA, в которой получили развитие методы оптического дистанционного зондирования арктических прибрежных вод на основе использования специальных алгоритмов, учитывающих оптические характеристики арктической океанической атмосферы и повышенный вклад ВВ и РОВ в формирование прибрежной оптической среды [8].

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временных характеристик оптически активных веществ – хлорофилла «а» (ХЛ), взвешенного вещества (ВВ) и растворенного органического вещества (РОВ) – в Обской губе и на прилежащем мелководном Карском шельфе, а также обнаружение той устойчивой информации о состоянии исследуемой акватории, которую предоставляют результаты обработки спутниковых данных за многолетний период.

Несмотря трудности получения качественной спутниковой информации в Арктическом регионе, были получены регулярные временные ряды MERIS-данных (2003 – 2011), которые были обработаны в открытой программной среде BEAM-VISAT/ESA на основе метода нечеткой кластеризации в яркостном пространстве признаков для получения распределения основных оптических классов [9] и на основе нейросетевых (НС) алгоритмов для оптически сложных поверхностных вод [8]. Проведенные исследования и обработанная к настоящему времени часть материалов позволяют говорить о первых результатах:

1. Получены оптические классы вод и представлена динамика изменений модельных значений оптически активных веществ, а также первичных гидропатических характеристик за почти десятилетний период.
2. Получены дополнения к схеме летней циркуляции вод в Обском эстуарии и прилежащем шельфе, которые представляют пространственные детали и уточнения для опубликованных ранее данных.
3. 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 вглубь Обской губы в придонных слоях, а также является границей в распределении высоких «речных» концентраций биогенных элементов [4, 5, 7].
4. Выявлены детали межгодовой изменчивости ХЛ, ВВ и РОВ в отдельных частях Обской губы – устье, средней части, эстуарии и прилежащем шельфе – и Гыданской губе.

**Оптическая классификация на основе нечеткой кластеризации.** Важным инструментом предварительного анализа снимков оптически сложных вод является классификация яркостного пространства признаков на основе нечеткого кластерного анализа излучений водных объектов [9, 10]. Каждому кластеру соответствует некоторая характеристическая кривая в яркостном признаковом пространстве. При этом один и тот же элемент раstra  $i$  ( $i=1, N$ ) может принадлежать нескольким (или всем) кластерам  $j$  ( $j=1, C$ ). Такая нечеткость кластеризации формализуется через матрицу принадлежности  $U=(u_{ij})$ , состоящую из уровней принадлежности  $u_{ij}$ :

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

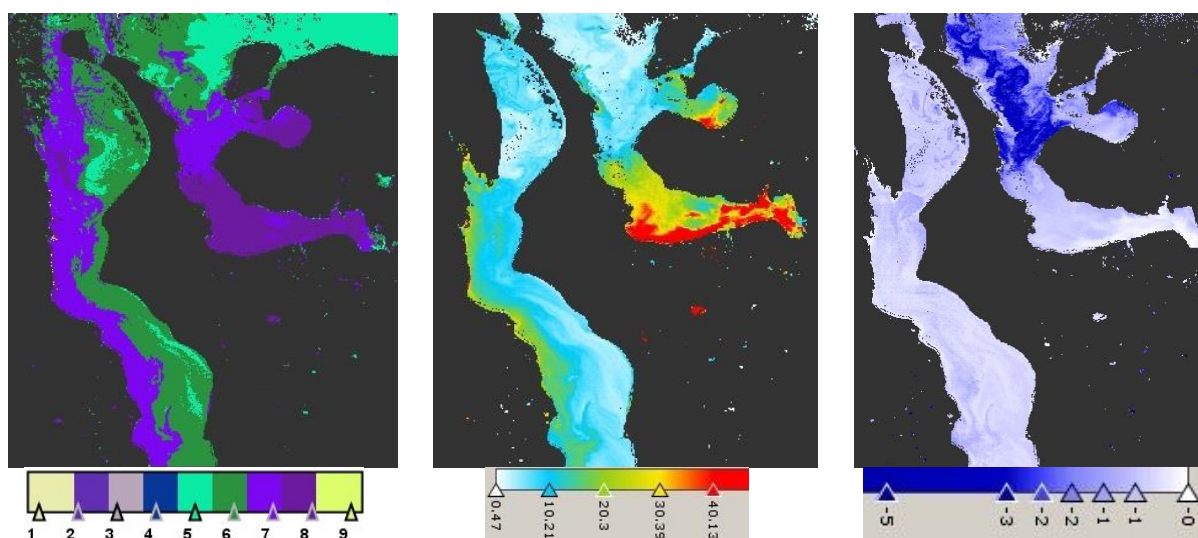


Рис. 1. Оптические классы (1-9), мутность (FNU), первая оптическая глубина (м): 15.07.2011.

На рис. 1 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.

Прозрачность воды относится к числу факторов, определяющих или лимитирующих продукционную активность фитопланктона. Низкая прозрачность является основной причиной относительно невысокого уровня поверхностной первичной продукции в богатых хлорофиллом и биогенными элементами водах Обской губы. При этом основная часть Карского моря отличается низкой биопродуктивностью, поэтому в районах, не подверженных непосредственному влиянию материкового стока, воды оказываются весьма прозрачными.

Повышение мутности вод в прибрежных зонах, обусловленное эоловым переносом взвесей и взмучиванием донных осадков, связано с выносом взвесей речным стоком. Общей характерной 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).

**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 было проведено несколько экспедиций (1981, 1993, 2007, 2010, 2015), которые помогли получить точечные данные на нескольких доступных разрезах, преимущественно в осенний период. Оказалось, что Обская губа отличается биологической продуктивностью, являющейся самой высокой во всем Карском регионе [4,5].

Результаты НС-моделирования за 2003–2011, часть из которых представлена на рис. 2:

- подтвердили 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;
- предоставили устойчивые структуры полей распределения концентраций ХЛ в летний период;
- показали некоторый рост концентраций ХЛ в Обском эстуарии и прилежащем Карском шельфе (рис. 3).

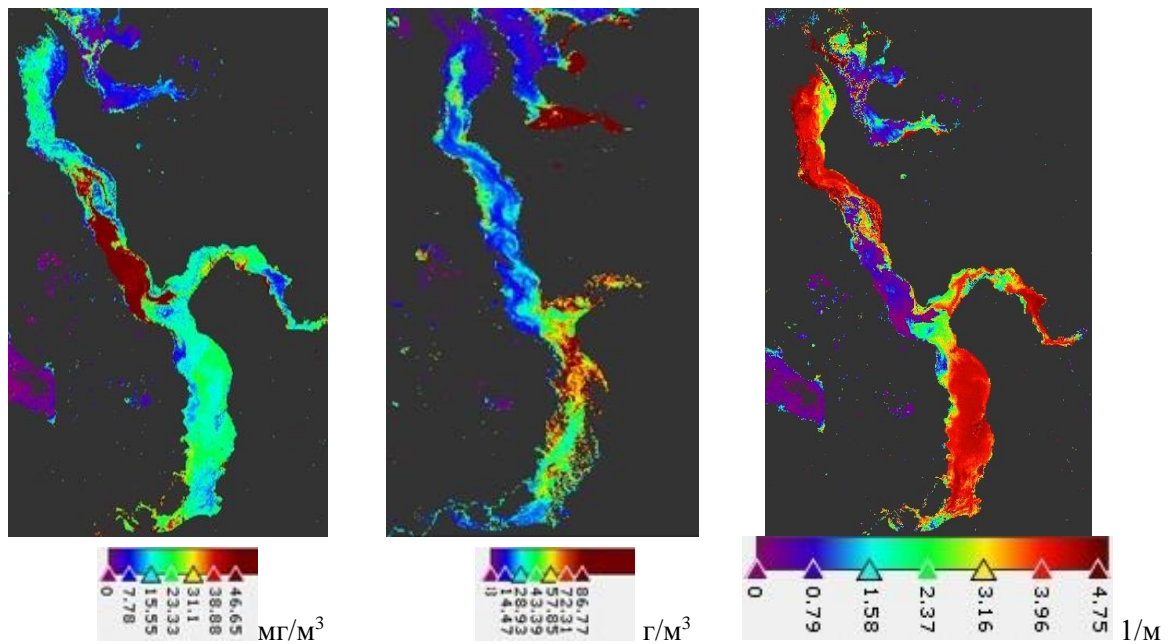


Рис. 2. Концентрации ХЛ (12.07.2005), ВВ (30.07.2010) и коэффициент поглощения РОВ (12.07.2005).

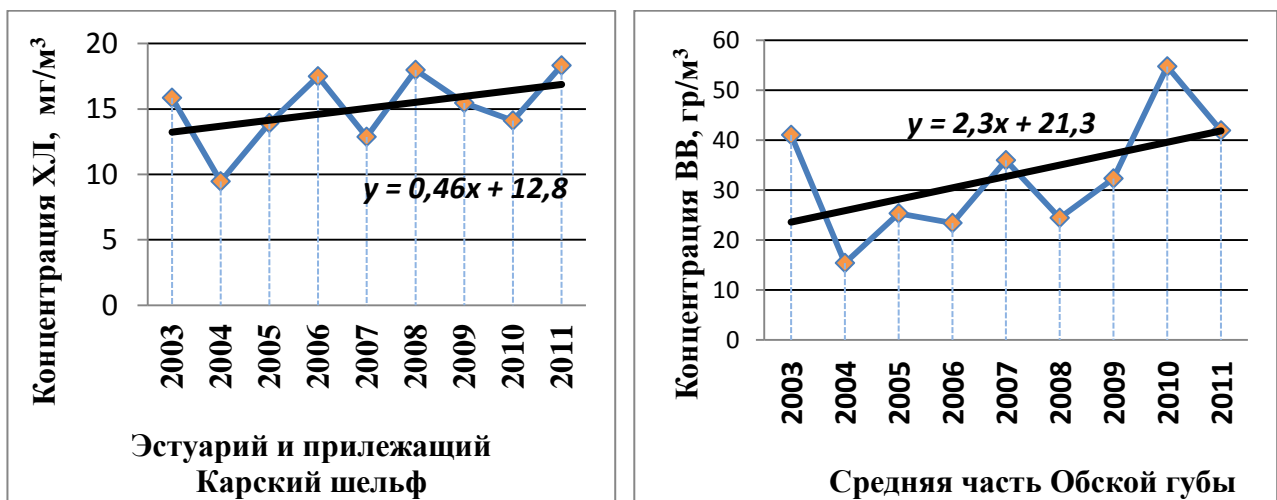


Рис. 3. Средние значения концентрации ХЛ и ВВ в Обской губе и шельфе.

Опресненная зона характеризуется самым высоким содержанием ХЛ, что может быть связано с массовым выносом фитопланктона с речными водами и высокой мутностью. Максимальные модельные концентрации ХЛ в опресненной зоне соответствуют области слияния вод Обской губы и вод Тазовской губы, 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.

**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 [11].

Максимальные значения модельных концентраций ВВ наблюдаются в устье Обской, Тазовской и Гыданской губ. Для каждого из этих заливов существует свой рубеж, или фронтальная зона (рис. 2), где скорость потока речных вод замедляется, и основная масса взвешенных

частиц, особенно ее крупные фракции, выпадает на дно [11]. За пределами этих фронтальных зон поля концентрации взвеси принимают существенно более низкие значения.

Значения коэффициента поглощения РОВ по всей акватории распределены достаточно неравномерно, что соответствует результатам проводимых ранее исследований [12]. Максимальные значения коэффициента поглощения РОВ соответствуют участкам 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. 2. 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 обский поток, создавая область возмущения.

Исследование динамики модельных значений (2003–2011) показало, что концентрации ВВ (рис. 3) и коэффициенты поглощения РОВ имеют одинаковую тенденцию к некоторому возрастанию в устье и средней части Обской губы, а также в Гыданской губе.

**Выводы.** Продемонстрированы возможности развития биооптических методов дистанционного зондирования в арктической акватории за почти десятилетний период времени.

Дополнительного исследования требует тот факт, что распределения концентраций ХЛ и ВВ аппроксимируются логонормальной 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.

Следует отметить, что исследуемой территории грозит активное воздействие: с пресноводным стоком на Карский шельф выносится более 150 млн.т 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 колоссальных накопленных экологических рисков.

Все вышесказанное подчеркивает крайнюю важность регулярных спутниковых наблюдений и развития представленных методов с целью осуществление эффективного контроля качества вод в арктических акваториях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-45-890664).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Frey K.E., Comiso J.C., Cooper L.W., Gradinger R.R., Grebmeier J.M., Saitoh S.I. & Tremblay J.É. (2014). Arctic Ocean Primary Productivity, Arctic Report Card 2014. <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.
- [2] Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. IOCCG Report Number 3, 2000. [www.ioccg.org/reports/report3.pdf](http://www.ioccg.org/reports/report3.pdf).
- [3] Antoine D., Hooker S.B., B'elanger S., Matsuoka A., Babin M. Apparent optical properties of the Canadian Beaufort Sea: Part 1: Observational overview and water column relationships. Biogeosciences, European Geosciences Union. 2013. №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.
- [5] Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Мошаров С.А, Демидов А.Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21-31.

- [6] Heim, B., Abramova, E., Doerffer, R., Günther, F., Hölemann, J., Kraberg, A., Lantuit, H., Loginova, A., Martynov, F., Overduin, P.P., and Wegner, C.: Ocean colour remote sensing in the southern Laptev Sea: evaluation and applications, *Biogeosciences*. 2014. №11. P. 4191-4210, doi:10.5194/bg-11-4191-2014.
- [7] Суханова И.Н. и др. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в обском эстуарии и на прилежащем карском шельфе // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 5. С. 785-800.
- [8] Ruddick et al. The Coast Colour project regional algorithm round robin exercise. <http://www.coastcolour.org/publications/7858-6.pdf>.
- [9] Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометиздат. 1980. 248 с.
- [10] 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. 143:97-111. doi:10.1016/j.rse.2013.11.021.
- [11] 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.
- [12] 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.