

Санкт-Петербургский государственный университет

ПАШОВКИНА Анастасия Андреевна

Выпускная квалификационная работа

Оценка окрашенного растворенного органического вещества в водоемах Арктики

Направление *05.03.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *СВ.5021.2015 «Гидрометеорология»*

Профиль *«Гидрология»*

Научный руководитель:

доцент кафедры геоэкологии и природопользования,

Институт Наук о Земле,

к.г.н., Федорова И.В.

Рецензент:

заведующая и руководитель лаборатории гидрофизики,

Институт водных проблем Севера, КарНЦ РАН,

к.г.н., Здоровеннова Г.Э.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

Список используемых сокращений.....	4
Введение.....	5
Глава 1. Теоретико-методологические основы изучения ОРОВ в водных объектах.....	7
Глава 2. Оценка содержания ОРОВ в природных водах: подходы, методы, прогноз	10
2.1. Понятие оценки содержания ОРОВ в природных водах.....	10
2.2. Методы определения общего содержания РОВ в воде	11
2.2.1. Окисляемость воды	12
2.2.2. Биохимическое потребление кислорода	14
2.3. Цветность воды	15
2.4. Методы и сроки определения содержания РОВ на постах сити Росгидромета.....	15
2.5. Окрашенное растворенное органическое вещество (ОРОВ)	18
2.5.1. Методика пробоотбора на содержание ОРОВ	18
2.5.2. Анализ проб на ОРОВ и их обработка спектрофотометрическим методом в лабораторных условиях.....	18
2.5.3. Методика использования данных дистанционного зондирования для определения содержания ОРОВ в водных объектах	20
Глава 3. Физико-географическое описание и характеристика особенностей районов расположения объектов исследования.....	22
3.1. Кольский полуостров	22
3.2. Полуостров Ямал	27
3.3. Дельта р. Лены	29
Глава 4. Содержание ОРОВ в водных объектах трех арктических регионов: Кольский полуостров, полуостров Ямал, дельта р. Лены	32
4.1. Результаты анализа пробы воды с водных объектов Кольского полуострова (2019 г) и их интерпретация	32
4.2. Результаты анализа пробы воды с водных объектов дельты р. Лены (2016 и 2018 гг.) и их интерпретация.....	34
4.3. Результаты анализа пробы воды с водных объектов полуострова Ямал (2018 г) и их интерпретация	41
4.4. Сравнение содержания ОРОВ для трех рассматриваемых регионов....	43
Глава 5. Определение содержания ОРОВ в воде с применением данных дистанционного зондирования	47

5.1. Получение уравнения зависимости отношения зеленого и красного спектральных каналов и лабораторных данных по ОРОВ (по данным для полуострова Ямал).....	47
5.2. Апробация полученного уравнения связи на водных объектах дельты р. Лены с известными значениями концентрации ОРОВ.....	50
Заключение	53
Список литературы	56

Список используемых сокращений

ААНИИ - Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

БПК – биохимическое потребление кислорода

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ООН – Организация Объединенных Наций

ОРОВ – окрашенное растворенное органическое вещество

ПДК – предельно допустимые концентрации

РОВ – растворенное органическое вещество

РОУ – растворенный органический углерод

УФ – ультрафиолетовый диапазон длин волн

ХПК – химическое потребление кислорода

ЮНЕП – от англ. UNEP, United Nations Environment Programme – Программа ООН по окружающей среде

CDOM – coloured dissolved organic matter – окрашенное растворенное органическое вещество

S – значение спектрального уклона кривой абсорбции ОРОВ

SNAP – Sentinel application platform – программа для работы со спутниковыми снимками «Sentinel»

Sr – коэффициент уклона спектральной кривой

$\alpha_{\text{ОРОВ}}(\lambda)$ – значение абсорбции окрашенного растворенного органического вещества (оптической плотности) на длине волны λ

Введение

Огромные пространства Арктики и Субарктики России, примыкающие к Северному Ледовитому океану, пока что сравнительно мало изучены с точки зрения состава и состояния поверхностных вод.

На сегодняшний день программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) выделяет среди актуальных экологических проблем арктического региона изменение климата, влекущее за собой активизацию процессов термоденудации и термоэрозии в криолитозоне, тесно связанных с гидросистемами на ее территории.

Проведения мониторинга содержания в водных объектах арктической зоны растворенных органических веществ (РОВ), количество которых возрастет в результате упомянутых выше процессов, в настоящее время имеет серьезные экономические и технические ограничения из-за труднодоступности удаленных районов. К числу особенностей Арктики, также препятствующих организации и ведению регулярного мониторинга, относятся суровый климат, широкое распространение многолетнемерзлых грунтов, преобладание эрозионных процессов, интенсивность ветров.

Известно, что избыток РОВ в воде оказывает непосредственное влияние на экологическое состояние водных экосистем. Концентрация РОВ может оказывать существенное влияние на биологическую активность в водных системах, поскольку окрашенная растворенная органика (ОРОВ) уменьшает интенсивность света при его проникновении в воду. Очень высокие концентрации ОРОВ могут оказывать ограничивающее влияние на фотосинтез и ингибировать рост фитопланктона (Stedmon et al., 2000), который составляет основу водных пищевых цепей и является основным источником атмосферного кислорода в водных экосистемах.

Все это обуславливает необходимость организации мониторинга содержания ОРОВ в воде, чему может способствовать развитие применения современных подходов к проведению аналитических исследований, а также использование дистанционных методов для ведения наблюдений. Это

обуславливает актуальность выбранной тематики работы – оценки содержания окрашенной растворенной органики в водоемах арктических регионов с применением метода спектрофотометрии и данных дистанционного зондирования.

В качестве объектов исследования были выбраны озера трех районов: полуостров Ямал, дельта р. Лены и Кольский полуостров. Первые два района расположены в Арктическом поясе, последний – в Субарктическом.

Целью данной работы является определение концентрации окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) в водных объектах и выявление пространственно-временных особенностей динамики его количества в воде.

К задачам работы отнесены:

- 1) Обзор ранее опубликованных материалов по теме исследования;
- 2) Рассмотрение методов определения содержания ОРОВ в воде;
- 3) Лабораторный анализ проб воды на концентрацию ОРОВ;
- 4) Применение метода дистанционной оценки концентрации ОРОВ в программе Sentinel application platform (SNAP) для водных объектов полуострова Ямал;
- 5) Анализ полученных результатов.

Работы выполнялись в рамках проекта РФФИ Арктика 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.н. Федоровой Ирине Викторовне, а также к.г.-м.н. Дворникову Юрию Александровичу и д.г.н Дмитриеву Василию Васильевичу за ценные советы при подготовке выпускной квалификационной работы. Отдельную благодарность автор выражает коллективу лаборатории им. Отто Шмидта (ААНИИ) за предоставление возможности свободно использовать лабораторное оборудование для анализа проб воды.

Глава 1. Теоретико-методологические основы изучения ОРОВ в водных объектах

Органическое вещество является неотъемлемой частью вод любых существующих водных объектов, где может находиться во взвешенном или растворенном виде. В работе рассматривается растворенное органическое вещество (РОВ), а именно – его окрашенная часть – окрашенное растворенное органическое вещество (ОРОВ), в англоязычной литературе аналог – coloured dissolved organic matter (CDOM), которая является важным компонентом для водных экосистем (Kalle, 1939; Скопинцев, 1950). Так ОРОВ может оказывать влияние на глубину проникновения солнечного света в водную толщу и на температурный режим водных объектов, поскольку, в основном, поглощает коротковолновое излучение (ультрафиолетовое и голубой участок видимого диапазона спектра) (Zaneveld, 1975; Vincent, Pienitz, 1996; Twardowski, Donaghay, 2001).

Границу между взвешенной и растворенной фракциями ОРОВ проводят исходя из размера молекул вещества. Считается (Романкевич, 1997), что молекулы растворенной фракции имеют размер $>0,45$ -1 микрометра (мкм). Соответственно, отделение растворенной фракции от взвешенной может производиться с помощью фильтра, имеющего соответствующий диаметр пор.

Обе существующие фракции по функциональной активности подразделяются на два вида органического вещества: лабильное и стойкое. Лабильная органика легко вступает в биотический круговорот, эффективно усваивается водными организмами, а также играет важнейшую роль в функционировании водных экосистем, в том числе в процессах биологического самоочищения, формирования качества вод и биологической продуктивности водоемов (Верес, Остапеня, 2011). В состав стойкой фракции органического вещества входит множество различных соединений, таких как: органика сточных вод; водный гумус планктонного происхождения; почвенный гумус, поступающий с поверхностным стоком; органическое вещество растительных остатков и древесины. Стойкая фракция окисляется со

значительно меньшей скоростью, а кинетические закономерности ее окисления и механизмы деструкции еще недостаточно изучены (Губернаторова, Дину, 2015).

В состав ОРОВ, в основном, входят гуминовые и фульвокислоты (Скопинцев, 1950; Wetzel, 2001), которые играют специфическую роль в цикле углерода и служат источником питания для обитающих в воде гетеротрофных бактерий.

Известно, что ОРОВ – это составляющая часть растворенного органического углерода (РОУ), в англоязычной литературе - dissolved organic carbon (DOC). Содержание в воде РОУ часто используется для определения содержания органики в воде. Таким образом, ОРОВ может служить оптически измеряемым показателем РОУ, а также показателем «цветности» (Gjessing, 1976).

По происхождению растворенная органика в водоемах делится на два вида: автохтонное и аллохтонное (Исидоров, 2001). Автохтонное образуется в пределах самих водоемов, являясь продуктом жизнедеятельности фитопланктона, а аллохтонное является поступившим в водный объект из вне – с территории водосборного бассейна.

Так при процессе питания бактерий, обитающих в воде, питательные вещества поступают в бактериальную клетку через всю её поверхность. Они должны быть растворимы в воде, поскольку только в этом случае создаются условия для диффузии вещества в цитоплазму клетки. Часть органических веществ, которые совсем не растворяются в воде или дают коллоидные растворы, переводятся ферментами бактериальной клетки в водорастворимое состояние после их гидролиза до более простых и растворимых в воде соединений (Бухгалтер и др., 2003). Также растворенная органика может поступать в водную среду при процессах питания зоопланктона и моллюсков. К автохтонному РОВ относятся и все метаболиты живых организмов – продукты обмена веществ в их клетках.

Аллохтонное органическое вещество может поступать в водные объекты не только естественным путем, но и в результате человеческой деятельности – со стоком промышленных, хозяйственно-бытовых и сельскохозяйственных вод.

Из-за неблагоприятных климатических условий и сравнительно небольшого количества фитопланктона в северных высокоширотных озерах главная роль в формировании общей концентрации ОРОВ принадлежит аллохтонному растворенному органическому веществ, в то время как автохтонное вещество не играет определяющей роли (Wetzel, 2001, Engstrom, 1987).

Глава 2. Оценка содержания ОРОВ в природных водах: подходы, методы, прогноз

2.1. Понятие оценки содержания ОРОВ в природных водах

Термин «оценка» имеет много различных определений в зависимости от сферы его применения. Так по В.В. Дмитриеву (2001) при рассмотрении экологического состояния водных объектов оценкой называется отношение субъекта (человек) к объекту оценивания (географический объект или сложная система), установление значимости для субъекта этого объекта в целом или отдельных его свойств на основе их соответствия определенным уровням или нормам. Оценки применяются для нахождения количественных значений свойств при анализе исследуемого объекта или процесса на основе экспериментальных данных, а также при определении численных значений существующих параметров (Дмитриев, 2001). Единичные оценки производятся по отдельным исходным характеристикам путем сопоставления с некоторыми уровнями и нормами. Косвенные оценки сводятся к установлению значимости объекта по показателям, отражающим функциональные и коррелятивные взаимосвязи. Они отражают достоинства и недостатки не непосредственно, а через сопряженные показатели. Существует также понятие интегральной оценки, предполагающей наличие этапа, связанного с объединением в одно целое ранее разнородных оценок с учетом их вклада в общую оценку.

В работе были оценены 3 измеряемых параметра ОРОВ:

1. $\alpha_{\text{ОРОВ}}(\lambda)$, нм^{-1} - значение абсорбции (оптической плотности) электромагнитного излучения на определенном участке спектра (длине волны, λ). Абсорбция ОРОВ на определенной λ прямо пропорциональна концентрации ОРОВ в воде. На сегодняшний день классификации водных объектов по содержанию в них ОРОВ отсутствуют. Поэтому в данной работе оценка количественного содержания ОРОВ проводилась путем сравнения со средним значением для региона.

2. Спектральные характеристики ОРОВ, такие как значение спектрального угла наклона S (нм^{-1}) в ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазонах длин волн, могут быть использованы для определения источников ОРОВ в водном объекте (Twardowski et al., 2004; Helms et al., 2008; Carder et al., 1989). Так спектральный угол наклона S видимого диапазона со значениями от 0,014 до 0,017 нм^{-1} является типичным значением для ОРОВ в пресных водоемах (например, Helms et al., 2008). Отклонение величины S в ультрафиолетовом диапазоне (УФ) от S в видимом может указывать на содержание различных типов ОРОВ. Значения S (видимый) в диапазоне длин волн от 300 до 500 нм или от 350 до 400 нм выше 0,02 нм^{-1} свидетельствуют о преобладании автохтонного растворенного органического вещества. То есть это ОРОВ, происходящее от лизиса (растворения) и дегградации фитопланктона.

3. S_r – отношение S (УФ) / S (видимый) может использоваться в качестве индикатора фотодегградации (дает информацию о возрасте ОРОВ). Величина $S_r = 1,2$ – типичное значение S_r для поверхности пресной воды; $S_r < 1,2$ указывает на свежие и богатые гуминовыми кислотами наземные органические вещества, тогда как $S_r > 1,2$ может указывать на фотодегградацию (Skorospekhova et al., 2018).

Также была произведена экспериментальная оценка содержания ОРОВ в воде с использованием данных дистанционного зондирования по косвенному показателю – отношению зеленого и красного спутниковых спектральных каналов (Kutser et al. 2005a, 2005b).

2.2. Методы определения общего содержания РОВ в воде

Для лучшего понимания природы растворенного органического вещества в воде, а также способов работы с ним, необходим обзор существующих на сегодняшний день методов его определения, помимо метода, непосредственно применяемого в работе.

Как уже упоминалось ранее, растворенная органика, в основном, состоит из гуминовых и фульвокислот. Также в ее состав входят различные

сахара, аминокислоты, витамины и другие подвижные фракции органического вещества, многие из которых выделяются в воду в процессе жизнедеятельности гидробионтов.

Характеристикой общего содержания органических веществ в воде может считаться содержание в ней растворенного органического углерода (РОУ), поскольку в среднем органический углерод составляет 50% всей массы растворенного органического вещества. Для оценки РОУ в воде производится определение таких показателей, как окисляемость воды (перманганатная и бихроматная) и биологическое потребление кислорода (БПК). Содержание РОУ в природных водах изменяется в широких пределах от 1 мг/л до 10-20 мг/л для чистых вод, а в загрязненных может достигать сотен мг/л (Семенов и др., 2001).

2.2.1. Окисляемость воды

Под окисляемостью воды понимают количество кислорода или искусственно введенного окислителя (например, KMnO_4 или $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), идущее на окисление содержащихся в воде органических веществ. Различают перманганатную (KMnO_4) и бихроматную ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) окисляемость (Тюменцева, 2010).

Перманганатная окисляемость воды — это общая концентрация потребляемого кислорода, соответствующая количеству иона перманганата, затраченного при обработке данным окислителем в определенных условиях определенной пробы воды. Перманганатная окисляемость характеризует легкоокисляемую часть органических веществ. В среднем 1 мг кислорода перманганатной окисляемости соответствует 1 мг углерода органического вещества (Семенов и др., 2001).

Реакция окисления ионом перманганата может протекать как в кислой, так и в щелочной или в нейтральной среде. Наиболее полно реакция протекает в кислой среде, но при большом содержании хлорид-ионов в пробе перманганатную окисляемость определяют в нейтральной или в щелочной среде. Также на значение перманганатной окисляемости могут оказывать

влияние такие восстанавливающие соединения, как соли железа (II), нитриты и сероводород.

Сущность метода заключается в окислении органических и неорганических веществ, присутствующих в пробе анализируемой воды заданным количеством перманганата калия в сернокислой среде в процессе нагревания, при последующем добавлении оксалат-иона в виде раствора оксалата натрия или раствора щавелевой кислоты, и титровании его избытка раствором перманганата калия. Значение перманганатной окисляемости в пересчете на атомарный кислород определяется по количеству пошедшего на титрование перманганата калия (ГОСТ Р 55684-2013).

Сущность метода определения бихроматной окисляемости заключается в обработке пробы воды серной кислотой и бихроматом калия при заданной температуре в присутствии сульфата серебра - катализатора окисления, и сульфата ртути (II), используемого для снижения влияния хлоридов, и определении значений химического потребления кислорода (ХПК - количество кислорода, потребляемое при химическом окислении содержащихся в воде органических и неорганических веществ под действием различных окислителей) в заданном диапазоне концентраций путем измерения оптической плотности исследуемого раствора при заданном значении длины волны с использованием градуировочной зависимости оптической плотности раствора от значения ХПК (ГОСТ 31859-2012).

Степень окисления присутствующих в поверхностных водах органических веществ бихроматом в крепком растворе серной кислоты близка к 100%. Бихроматная окисляемость служит для определения суммарного содержания органических веществ, которое рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{12 \cdot a}{32},$$

где a - величина бихроматной окисляемости, C - содержание органического углерода.

Содержание органического вещества находится путем двукратного увеличения полученного значения C (Семенов и др., 2001).

2.2.2. Биохимическое потребление кислорода

Биохимическое потребление кислорода (БПК) - количество кислорода, потребляемое при биохимическом окислении исследуемого вещества микроорганизмами в аэробных условиях. Также выражается как количество кислорода в мг, потребляемого на мг исследуемого вещества (ГОСТ 32427-2013).

Основа метода в том, что при хранении воды в склянке с притертой пробкой в условиях полной темноты содержание растворенного кислорода в ней убывает. Кислород в результате жизнедеятельности микроорганизмов затрачивается на окисление имеющегося в воде органического вещества и, в первую очередь, нестойкого (легкоусвояемого) органического вещества.

Обычно инкубация проб в анаэробных условиях производится в течение 5 суток, в темноте, при 20°C и обозначается БПК₅. Это определение дает относительное представление о содержании в воде легкоокисляющихся органических веществ. Чем выше их концентрация, тем больше потребление кислорода. В поверхностных водах БПК₅ колеблется обычно в пределах от 0,5 до 4 мгО₂/л и характеризует степень загрязнения водоема.

Значения БПК₅ от 0,5 до 1,0 мгО₂/л - очень чистые воды; 1,1-1,9 - чистые воды; 2,0-2,9 - умеренно загрязненные; 4-10 - грязные; 10 и более - очень грязные.

Из методов, предложенных для определения БПК, наибольшее применение получил скляночный метод. Суть этого метода состоит в определении БПК при определенной температуре в изолированных водных микросистемах, в предположении, что аналогичные процессы, связанные с утилизацией имеющихся в воде органических веществ и потреблением кислорода, развиваются и в макросистемах (Семенов и др., 2001).

2.3. Цветность воды

С содержанием растворенных органических веществ в воде неразрывно связано понятие ее цветности.

Цветность воды обычно обусловлена присутствием окрашенного органического вещества (главным образом гуминовых и фульвовых кислот, связанных с гумусом почвы). На цветность воды сильно влияет присутствие железа и других металлов в виде естественных примесей или в качестве продуктов коррозии. Она бывает также обусловлена загрязнением водоисточника промышленными стоками. Для показателя цветности питьевой воды Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) не устанавливает никакого конкретного значения, которое влияет на здоровье человека (ГОСТ 31868-2012).

Цветность – это условно принятая количественная характеристика для описания цвета природной и питьевой воды, имеющей незначительную естественную окраску. Она определяется сравнением с растворами специально приготовленной шкалы цветности и выражается в градусах цветности этой шкалы, является косвенным показателем количества содержащихся в воде растворенных органических веществ. Измерение цветности природных вод необходимо для правильного выбора технологии водоподготовки.

Для определения цветности существует 2 метода: метод визуального определения – его применяют только при необходимости ориентировочной оценки цветности; метод фотометрического определения цветности с применением хром-кобальтовой или платино-кобальтовой шкал (ГОСТ 31868-2012).

2.4. Методы и сроки определения содержания РОВ на постах сити Росгидромета

Содержание РОВ в воде определяют на пункты контроля качества водоемов и водотоков, подразделяемых на I, II, III и IV категории. Категории пунктов и их расположение определяют в установленном порядке с учетом

комплекса факторов: народно-хозяйственного значения водного объекта, качества воды, размера и объема водоема, размера и водности водотока и других факторов (ГОСТ 17.1.3.07-82).

Пункты контроля категории I располагают на средних, больших водоемах или водотоках, имеющих важное народно-хозяйственное значение: в районах городов с населением свыше 1 млн жителей; в местах нереста и зимовья особо ценных видов промысловых организмов; в районах повторяющихся аварийных сбросов загрязняющих веществ и заморных явлений среди водных организмов; в районах организованного сброса сточных вод, в результате чего наблюдается высокая загрязненность воды. Допускается располагать пункты контроля категории I на малых водоемах и водотоках (ГОСТ 17.1.1.02-77).

Пункты контроля категории II располагают на водоемах и водотоках: в районах городов с населением от 0,5 до 1 млн жителей; в местах нереста и зимовья промысловых организмов ценных видов; на важных для рыбного хозяйства предплотинных участках рек; в местах организованного сброса дренажных сточных вод с орошаемых территорий и промышленных сточных вод; при пересечении реками государственной границы; в районах со средней загрязненностью воды (ГОСТ 17.1.1.02-77).

Пункты контроля категории III располагают на водоемах и водотоках: в районах городов с населением менее 0,5 млн жителей; на замыкающих участках больших и средних рек; в устьях загрязненных притоков больших рек и водоемов; в районах организованного сброса сточных вод, в результате чего наблюдается низкая загрязненность воды (ГОСТ 17.1.1.02-77).

Пункты контроля категории IV располагают на незагрязненных участках водоемов и водотоков, а также на водоемах и водотоках, расположенных на территории государственных заповедников и природных национальных парков, являющихся уникальными природными образованиями (ГОСТ 17.1.1.02-77).

Периодичность проведения контроля по гидрохимическим показателям устанавливается в соответствии с категорией пункта контроля (таблица 1).

Таблица 1

Периодичность проведения контроля и программа контроля для пунктов контроля I, II, III и IV категории (ГОСТ 17.1.3.07-82)

Периодичность проведения контроля	Программа контроля для пунктов контроля категории			
	I	II	III	IV
Ежедневно	Сокращенная программа 1	Визуальные наблюдения	-	-
Ежедекадно	Сокращенная программа 2	Сокращенная программа 1	-	-
Ежемесячно	Сокращенная программа 3			-
В основные фазы водного режима	Обязательная программа			

Так обязательная программа предусматривает определение содержания в воде растворенных органических веществ следующими методами: химическое потребление кислорода, мг/дм (мг/л); биохимическое потребление кислорода за 5 суток, мг/дм (мг/л). Также проводят наблюдения за цветностью воды, градусы.

Сокращенная программа 1 не предусматривает определение цветности воды и содержания в воде растворенной органики.

Сокращенные программы 2 и 3 предусматривают определение содержания в воде растворенных органических веществ теми же методами, что и в случае обязательной программы: химическое потребление кислорода, мг/дм (мг/л); биохимическое потребление кислорода за 5 суток, мг/дм (мг/л). Цветность воды не определяется.

При определении означенных показателей качество воды оценивают путем сопоставления этих показателей, определяемых в пунктах контроля, с установленными нормами качества воды (ГОСТ 17.1.3.07-82).

2.5. Окрашенное растворенное органическое вещество (ОРОВ)

В настоящее время существует метод определения содержания ОРОВ в воде с применением метода спектрофотометрии, который был применен в данной работе.

2.5.1. Методика пробоотбора на содержание ОРОВ

В работе для сравнения были выбраны три арктических района: Кольский полуостров, полуостров Ямал, дельта реки Лены. Так за летний период были проанализированы 24 пробы с полуострова Ямал (сроки пробоотбора: 11-20 июня 2018 года) (грант РФФИ Арктика 18-05-60291); за зимний – 9 проб с Кольского полуострова (сроки пробоотбора: 20-24 февраля 2019 года) (грант РФФИ Арктика 18-05-60291), 32 пробы с дельты р. Лены (9-22 апреля 2016 года) (Skorospekhnova et al., 2017), 27 проб с дельты р. Лены (19-25 апреля 2018 года) (научно-исследовательская экспедиция «Лена - 2018»). Всего в общей сложности было обработано 92 пробы на ОРОВ.

Образцы хранились в склянках из темного стекла в прохладных условиях, с целью предотвращения фотодеградации органического вещества под воздействием ультрафиолета (Bricaud et al., 1981). Образцы при пробоотборе фильтровались с применением стекловолокнистых фильтров Whatman GF/F, размер пор которых составляет 0,7 мкм (микрометров).

2.5.2. Анализ проб на ОРОВ и их обработка спектрофотометрическим методом в лабораторных условиях

Спектрофотометрический анализ проб выполнялся на двухлучевом спектрофотометре SPECORD-200 (Jena Analytic©, Jena, Germany) в лаборатории им. Отто Шмидта Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Для проведения анализа указывался диапазон длин волн 200-750 нм - ультрафиолетовый и видимый участки электромагнитного спектра, что позволило определить спектры поглощения в каждой пробе. При проведении анализа оптическое разрешение прибора составляло 1 нм.

При проведении анализа детектор прибора измеряет интенсивность света, прошедшего сквозь кюветы с пробой воды, относительно начальной интенсивности. Расчет ведется по формуле:

$$T(\lambda) = I / I_0,$$

где I – зарегистрированная интенсивность прошедшего сквозь кювету света, I_0 – исходная интенсивность света, сгенерированного лампой.

С целью получения значений оптической плотности исследуется абсорбция (A_0) волн органическим веществом:

$$A_0(\lambda) = -\log(I / I_0).$$

Для трансформирования этого значения в абсорбцию на метр, необходимо произвести пересчет полученного значения с приведением к натуральному логарифму и с учетом длины кюветы (l) в метрах по формуле:

$$\alpha_{\text{ОРОВ}}(\lambda) = 2,303 \cdot A_0 / l.$$

В данной работе использовались кварцевые кюветы длиной 0,05 м.

Параметр оптической плотности $\alpha_{\text{ОРОВ}}(\lambda)$ напрямую характеризует концентрацию ОРОВ. Он оценивался на длине волны 440 нм, поскольку, по литературным данным (например, Дворников, 2016), значения для нее являются наиболее репрезентативными.

При обработке спектров поглощения ОРОВ также вычислялся наклон кривой абсорбции ОРОВ – S (нм^{-1}), который определялся между длинами волн 350 и 500 нм.

Вычисления производились по формуле:

$$a_{\text{ОРОВ}}(\lambda) = a_{\text{ОРОВ}}(\lambda_0) e^{-S(\lambda - \lambda_0)},$$

где λ_0 – длина волны, равная 440 нм, λ – длина волны на границе рассматриваемого диапазона.

Установлено (Jerlov, 1968), что с увеличением длины волны $\alpha_{\text{ОРОВ}}$ снижается экспоненциально.

Кроме того, вычислялся параметр S_r - коэффициент уклона спектральной кривой по формуле:

$$S_r = S(275-295) / S(350-400),$$

где $S(275-295)$ – спектральный угол наклона в ультрафиолетовом диапазоне (длины волн от 275 до 295 нм), S – спектральный угол наклона в видимом диапазоне (длины волн от 350 до 440 нм).

2.5.3. Методика использования данных дистанционного зондирования для определения содержания ОРОВ в водных объектах

В настоящее время существует несколько алгоритмов для дистанционного определения содержания ОРОВ в водных объектах с применением данных дистанционного зондирования (Twardowski et al., 2005; Kutser et al., 2005a, 2005b; Brezonik et al., 2005; Griffin et al., 2011). В данной работе использовался алгоритм, разработанный (Kutser et al. 2005a, 2005b) для дистанционного определения концентрации ОРОВ в озерах. Суть метода заключается в расчете отношения значений отраженной радиации в зеленом и красном каналах.

Для анализа концентрации ОРОВ были использованы снимки Sentinel-2A с разрешением 10 м, включающих в себя 13 спектральных каналов (каналы снимков нумеруются от В1 до В13, где «В» – от английского «band» – канал). Данный вид снимков был выбран, поскольку они имеют достаточно высокое пространственное разрешение и находятся в свободном доступе (снимки взяты с ресурса: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Отношение зеленого (ему соответствует канал В3) и красного (ему соответствует канал В4) каналов (В3/В4) были получены для 2 снимков Sentinel-2A, полностью покрывших рассматриваемую территорию. Даты выбора снимков подбирались максимально близкими к срокам пробоотбора – 11-20 июля 2018. Так первый использованный снимок за 20 июля 2018 года, второй – за 27 июля 2018 года.

Обработка снимков производилась в программе Sentinel application platform (SNAP), которая позволяет производить расчет отношения зеленого и

красного спектральных каналов и экспортировать полученные значения в формате .txt для точек с предварительными заданными координатами.

Далее по полученным значениям отношения зеленого и красного каналов для объектов и по данным, полученным для этих же объектов в лабораторных условиях в результате измерения ОРОВ в пробах воды, строилось поле точек. В поле точек проводилась линия тренда, наиболее полно описывающая полученную зависимость. В результате находилось уравнение зависимости значений отношения зеленого и красного спектральных каналов и измеренных в лаборатории концентрации ОРОВ, также для зависимости определялся коэффициент детерминации, обозначаемый как R^2 , для оценки ее значимости (максимальное значение коэффициента для признания зависимости значимой составляет 1).

После получения уравнения связи становится возможным его применение для прогноза содержания ОРОВ в других водных объектах полуострова Ямал на основе отношения зеленого и красного спектральных каналов, полученного по спутниковым снимкам уже для территории, на который расположены интересующие для прогноза объекты. Уравнение позволяет производить пересчет полученного значения отношения каналов в величину $\alpha\text{ОРОВ}$ (440), нм^{-1} . Апробация полученного уравнения связи на водных объектах полуострова Ямал по данным за 2016 год подробно описана в Главе 5 (пункт 5.2).

Глава 3. Физико-географическое описание и характеристика особенностей районов расположения объектов исследования

3.1. Кольский полуостров

Кольский полуостров расположен на крайнем севере России, и большая часть его территории находится за Северным полярным кругом. С севера полуостров омывают воды Баренцева моря, на юге и востоке — воды Белого моря. На западе границей Кольского полуострова служит меридиональная впадина, проходящая от Кольского залива по долине реки Кола, озеру Имандра и реке Ниве до Кандалакшского залива (Кольская энциклопедия, 2009).

На территории полуострова наблюдается разнообразный климат. Так на северо-западе, где близко проходит теплое Северо-Атлантическое течение, он характеризуется, как субарктический морской. Центр, восток и юго-запад полуострова, где возрастает континентальность, относят к умеренно-холодному типу климата. Средние температуры для холодного периода составляют от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$; для самого теплого месяца (июль) температур составляют от $+13$ до $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерная особенность погоды – ее изменчивость и неустойчивость, частое прохождение циклонов и фронтов. Снежный покров лежит в период в среднем с середины-конца октября до середины мая (в горных районах - с конца сентября-начала октября до середины июня). Заморозки и выпадение снега возможны, также и в летний период. Преобладают ветры северо-восточного направления со скоростями (4-8 м/с). Зимой не редко случаются затяжные метели (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Почва промерзает на глубину 2-3 м. Начало промерзания, как правило, с середины ноября, оттаивания – в июне-июле по типам почвы делятся на тундровые, подзолистые, болотные, в небольшой степени - дерновые и подзолистые (Ресурсы поверхностных..., 1970).

На Кольском полуострове протекает много рек: Поной (самая длинная река на полуострове), Варзуга, Кола, Йоканга, Териберка, Воронья, Умба и другие.

Речная сеть на Кольском полуострове весьма развита, также здесь присутствует обильное количество озер и заболоченных пространств. Реки относятся к бассейнам двух морей – Баренцева и Белого. Наиболее крупными реками являются Поной (самая длинная река на полуострове), Варзуга, Кола, Йоканга, Териберка, Воронья, Умба и др. Из озер самые крупные — Имандра, Умбозеро, Ловозеро, Большой Вудъявр.

В западной части Кольского полуострова, характеризующейся расчлененным рельефом, территория достигает наибольших высот. Там расположены отдельные горные массивы с плоскими вершинами (Хибины, Ловозерские тундры), разделенные понижениями рельефа. Их высоты достигают 1000 м. Лишь единичные вершины превышают 1000 м. Для восточной половины Кольского полуострова характерен более спокойный волнистый рельеф с преобладающими высотами 150—250 м. Среди волнистой равнины возвышается гряда Кейвы (397 м), состоящая из отдельных цепей, вытянутых с северо-запада на юго-восток вдоль центральной части полуострова (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Кольский полуостров занимает восточную часть Балтийского кристаллического щита, в геологическом строении которого принимают участие мощные толщи архея и протерозоя. Архей представлен сильно метаморфизованными и интенсивно дислоцированными гнейсами и гранитами, местами прорванными пегматитовыми телами. Протерозойские отложения более разнообразны по составу — кварциты, кристаллические сланцы, песчаники, мраморы, частично гнейсы, переслаивающиеся с зеленокаменными породами.

Кольский полуостров специализируется на горнодобывающей и рыбоперерабатывающей промышленности. Цветная металлургия – это заводы по производству алюминия в Кандалакше и Надвоицах, медно-никелевое

производство - в Мончегорске и г. Никель, которые частично используют привозные руды из Норильска. На апатитовых концентратах Кольского полуострова работает большинство суперфосфатных заводов России. На порожистых реках полуострова созданы приливная и атомная электростанции (АЭС).

Район Апатитов – район сложных экологических проблем.

Впервые северная часть Кольского полуострова начала подвергаться постепенно возрастающей антропогенной нагрузке еще в 30-40-х годах XX века. Поскольку Кольский Север богат минерально-сырьевыми ресурсами, он имеет высокоразвитый промышленный потенциал и является одним из самых загрязняемых, по сравнению с другими субарктическими регионами мира (Моисеенко Т.И. и др., 1996). Это произошло в связи с началом освоения природных ресурсов данного региона. Так, в настоящее время, он относят к территориям, в пределах которых наблюдается высокая степень антропогенного воздействия на экосистемы в целом и, в частности, на водные объекты.

При хозяйственном освоении человеком регионов Арктики может наблюдаться целый спектр видов воздействий на окружающую среду, и на Кольском полуострове представлены практически все из них. Отмечается, что наиболее значительная нагрузка приходится на центральные крупные озера района, использование которых носит комплексный характер: питьевое и техническое водоснабжение; приемники и утилизаторы для промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных сточных вод; водный транспорт; сплав леса; охлаждение агрегатов АЭС; рыбное хозяйство; рекреация.

Озеро Имандра - самый крупный водоемом Кольского полуострова. Его длина составляет 109 км, средняя ширина – 3,2 км, площадь с островами – 880,5 км², средняя глубина – 13 м, объем воды – 10,86 км³. Площадь водосбора составляет 12300 км² и представлена 1379 водотоками. Из озера вытекает р. Нива. Озеро состоит из трех в значительной степени обособленных плесов:

Большой, Йокостровской и Бабинской Имандры, соединяющихся между собой узкими проливами – салмами (Рихтер, 1934).

На берегах оз. Имандра сосредоточены предприятия горно-металлургической, обогатительной, химической промышленности и атомной энергетики, построены города и поселки, проживает более 300 тыс. человек, что составляет примерно 35% общего числа жителей Мурманской области, что делает озеро иллюстрацией ситуации воздействия многолетнего комплексного загрязнения (Моисенко и др., 2009).

На качество воды озера в районе г. Мончегорск оказывает воздействие загрязненный поверхностный сток с прилегающей территории медно-никелевого производства и жилищно-коммунального хозяйства; в районе деятельности АО "Апатит" (г. Апатиты) в озеро через реки Белая и Жемчужная поступают отходы апатитонепелиновой промышленности; в губу Молочная (г. Полярные Зори) – в основном нормативно очищенные сбросы Кольской АЭС Минатома России; в створах п. Африканда и п. Зашеек прослеживается влияние неорганизованных сбросов прилегающих поселков. В пунктах наблюдений г. Мончегорск, п. Африканда и п. Зашеек вода продолжала характеризоваться хорошим качеством как "слабо загрязненная"; в створе г. Полярные Зори улучшилась до "условно чистой", за счет уменьшения числа загрязняющих веществ от 4-х (меди, фенолов, цинка, никеля) до 2-х (медь, фенолы). Вода оз. Имандра у г. Апатиты оценивалась 3-м классом как "загрязненная" (классификация на основе интервалов удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ)); среднегодовые концентрации соединений меди в воде были в пределах 4-6 ПДК, молибдена – 3-7 ПДК. В 2017 г. в воде озера у г. Апатиты – остров Избяной - было отмечено 2 случая высокого загрязнения (ВЗ) (3-5 ПДК) и 3 случая экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) (6-10 ПДК) соединениями молибдена; в Йокостровском проливе г. Апатиты – 4 случая ВЗ соединениями молибдена (3-5 ПДК) (Качество поверхностных..., 2017).

Большой Вудъявр — это озеро плотинного типа в Мурманской области, расположенное в центральной части Кольского полуострова, в г. Кировске. Площадь водосбора — 125 км². Площадь его водной поверхности 3,24 км², объем воды – 0,064 км³, наибольшая глубина 38,6 м, длина около 2 км, ширина 1,5 км (Качество поверхностных..., 2017).

В 2017 г. в воде озера Большой Вудъявр возросли среднегодовые концентрации соединений молибдена (до 17 хозяйственного ПДК), цинка (до 6 ПДК) и меди (до 3 ПДК), за счет чего качество воды озера ухудшилось; вода характеризовалась как "грязная". По соединениям молибдена было зарегистрировано 5 случаев ЭВЗ (13-26 ПДК) и 1 случай ВЗ (4 ПДК) (Качество поверхностных..., 2017).

Со сточными водами АО "Апатит" и ГУП "Апатитводоканал" (гг. Кировск и Апатиты) в оз. Большой Вудъявр и р. Белая поступают соединения минерального азота, органические и взвешенные вещества, фосфаты, нефтепродукты. В процессе добычи и обогащения апатито-нефелиновой руды эти водные объекты загрязняются фторидами – специфическими загрязняющими веществами шахтных, рудничных и промышленных сточных вод основных цехов АО "Апатит".

Расположенные в центральном промышленном районе Кольского полуострова р. Вите и оз. Чун-озеро считаются фоновыми водными объектами, вода которых в 2017 г. ухудшилась от "условно чистой" до "слабо загрязненной" за счет повышения среднегодовых концентраций соединений меди до 5 ПДК и увеличения количества загрязняющих веществ от 2-х до 4-х (Качество поверхностных..., 2017). Также на состав воды озера Чуна могло сказаться влияние воздушного переноса загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в ходе деятельности таких предприятий, как горнодобывающие, горно-перерабатывающие, металлургические.

3.2. Полуостров Ямал

Полуостров Ямал расположен в тундровой зоне, которая простирается от побережья Карского моря почти до полярного круга. Она занимает весь полуостров Ямал. Протяженность с севера на юг 500-650 км. Для полуострова Ямал характерно резкое изменение инсоляции по сезонам года. В январе-марте температура от -21 до -20 °С, минимальные температуры достигают -50 - -55 °С. Сильные ветры (7-9 м/с) создают жесткость погоды с циклонами (30-40 м/с). Метели и пурга бывают до 120 дней в году. Глубокое залегание многолетней мерзлоты – 100-400 м (Ресурсы поверхностных..., 1964). Полуостров Ямал находится в зоне избыточного увлажнения. Среднее количество осадков за год колеблется около 300 мм (Сидорчук, Баранов, 1999). Самый теплый месяц – август: средние значения температуры воздуха составляют 6-10 °С, при меридиональном переносе воздушных масс могут достигать 20-28 °С. Осадки выпадают в виде длительных морозящих дождей. Повсеместно распространена многолетняя мерзлота. Деятельный слой (горизонт сезонного протаивания) составляет 20-25 см.

Гидрологическая сеть на полуострове Ямал хорошо развита в связи с избыточным увлажнением и повсеместным распространением многолетнемерзлых пород, определяющим значение коэффициента стока, близкое к единице (Ресурсы поверхностных..., 1964). Реки питаются талыми снеговыми и дождевыми водами. Большее число рек полуострова протекает в широтном направлении. Основной водораздел проходит с севера на юг, восточнее оси полуострова. Реки западной части впадают в Байдарацкую губу или сразу в Карское море, а восточной - в Обскую губу. Наиболее крупные реки: Юрибей, Морды-Яха, Харасавэй, Надуй-Яха (Сидорчук, Баранов, 1999).

Также полуостров Ямал отличает обилие озер, 80% из которых являются внутриболотными. Распределение озер по территории неравномерное - относительно крупные озера расположены в центре полуострова.

В переувлажненных местах распространены гипновые болота. На сухих повышенных местах – суглинистые почвы, песчаный и щебнистый субстрат.

Рельеф и геологическое строение территории сформировались в условиях морской аккумуляции осадков в эпоху плейстоцена и перестройки рельефа под влиянием флювиальной и термоденудационной обработке поверхности в голоцене. В результате сформировался современный рельеф полуострова, характеризующийся ярусностью и большим разнообразием покровных отложений. Для территории полуострова характерны криогенные процессы.

Антропогенное загрязнение в тундровой зоне вызвано быстрыми темпами развития газодобычи. Минеральные ресурсы – основа современного развития Западной Сибири. В настоящее время известно более 150 месторождений нефти и газа, в т. ч. очень крупных (Бованенковское месторождение).

Природный газ представляет собой смесь газообразных соединений углерода и водорода. Считается, что он почти не загрязняет окружающую среду. Ближайшие перспективы газовой промышленности России связаны во многом именно с освоением месторождений полуострова Ямал.

Бурное развитие нефтегазовой промышленности ведет к интенсивным изменениям в природе, воздействует на поверхностные и подземные воды. При нефте- и газодобыче на поверхность почв, водоемов и болот попадают токсичные элементы. Северные водоемы из-за низкой температуры, недостаточной аэрации, малой биологической активности, обладают слабой способностью к самоочищению. Они очень быстро загрязняются. Широкое развитие болот с застойным поверхностным увлажнением предопределило длительную сохранность пленки загрязняющих веществ.

Исследованиями (Геоэкологическое состояние..., 2007) установлено, что сильно минерализованные воды и нефть уничтожают естественную растительность и биоту.

При добыче газа в атмосферу выделяются сероводород и двуокись серы. С атмосферными осадками они попадают в воду, увеличивая ее кислотность. При подготовке месторождений к освоению, отсыпке площадок и прокладке трубопроводов в зоне избыточного увлажнения и распространения многолетней мерзлоты из-за уплотнения поверхности нарушается гидрологический режим движения поверхностных и фильтрационных вод. В мерзлоте образуются просадки.

Развитие газодобычи сопровождается ростом населения, что влечет за собой изменение качества природных вод, сокращение рыбных ресурсов и пушных зверей.

3.3. Дельта р. Лены

Расположенная в субарктической тундровой зоне Восточной Сибири дельта реки Лены является самой большой дельтой Арктики. Она оказывает значительное влияние не только на режим моря Лаптевых, но и на весь Северный Ледовитый океан посредством стока пресной речной воды. Ее громадная лопасть, простирающаяся на 190 км с юга на север ($72,0-73,8^\circ$ с.ш.), на 250 км с запада на восток ($122,0-129,5^\circ$ в.д.), образовалась в результате выноса рекой наносов, эрозии и абразии более древних форм рельефа в условиях колебаний уровня моря и тектонических движений земной коры (Большаянов, 2013).

В долине реки Лены мощность мерзлых пород составляет в среднем 300-600 м. Толщина активного (сезонноталого) слоя колеблется в пределах 30-50 см. Так как дельта реки Лены входит в арктический климатический пояс, ее климат формируется под влиянием арктических воздушных масс. В первую половину зимы она находится под влиянием циклонической деятельности арктического фронта. С прохождением циклона связано выпадение осадков в виде снега и сильные холодные ветры до 40 м/с с пургой. Зима длится около 8 месяцев с температурой от -28 до -36 °С, снежный покров сходит в июне. Весна начинается в конце апреля, быстро увеличивается освещенность. Лето в среднем длится 2 месяца. Среднегодовая температура воздуха низкая,

составляет -15°C . В зимний сезон, который длится с конца сентября до конца марта, средняя температура составляет -30°C , для летнего периода средняя температура составляет $+7^{\circ}\text{C}$. В связи с низкими температурами и глубоким залеганием мерзлоты для зоны характерно незначительное испарение (около 50 мм в год) и транспирация. Количество осадков за год составляет 190 мм (Огородникова, Федорова, 2011).

Преобладание осадков над испарением и наличие водоупора в виде многолетней мерзлоты создает условия для избыточного увлажнения и большой обводненности территории. Коэффициент стока водосбора р. Лены составляет порядка 0,9. Река многоводна. Резко преобладает летний сток. На низменности долины расположена масса озер.

В районе наблюдается морозное выветривание. Берега реки Лены приурочены к щебнистым и супесчаным грунтам, признаки оглеения отсутствуют.

Своеобразность природы в низовьях Лены позволила некоторым авторам (Тимофеев, 1968) выделить район Лены в самостоятельную физико-географическую страну. Фундамент здесь погружен на 7-12 км, а поверхность представляет собой денудационную аккумулятивную и пластово-аккумулятивную равнину. Таким образом, берега русла реки Лены сложены меловыми континентальными песками, песчаниками, глинами и галечниками. Коренные породы перекрыты толщей озерно-аллювиальных отложений, содержащих обильные жилы и линзы льда. Широко распространены лессовидные карбонатные суглинки мощностью до 1 м.

Наличие лессовидных суглинков в столь северных широтах одна из специфических черт природной зоны дельты.

Прослеживается активная эрозийная и аккумулятивная деятельность.

Источниками минерализации вод, помимо подстилающих пород русла, служат также разрабатываемые в верховьях Лены месторождения угля (Ленский угольный бассейн), нефти (Марковское и Ярактинское месторождения кембрийской нефти), газа (Таас-Тумусское, Блахнинское,

Сабинское и др. месторождения), каменной соли, алюминиевых руд, бокситов и др.

Река Лена является важнейшей транспортной магистралью, связана с Северным морским путем.

Промышленное освоение минеральных ресурсов повлекло за собой изменение режима многолетней мерзлоты, но о локальных изменениях в дельте Лены можно больше говорить в контексте происходящих в районе процессов денудации.

Глава 4. Содержание ОРОВ в водных объектах трех арктических регионов: Кольский полуостров, полуостров Ямал, дельта р. Лены

Как уже ранее подробно описывалось в Главе 2 (пункт 2.1), в работе оценивались 3 измеряемых параметра ОРОВ:

1. $\alpha_{\text{ОРОВ}}(440)$, нм^{-1} - значение абсорбции (оптической плотности) электромагнитного излучения на определенном участке спектра (длине волны, равной 440 нм – выбрана, т.к., по литературным источникам (например, Дворников, 2016), дает наиболее репрезентативный результат) – прямо пропорциональна концентрации ОРОВ в воде.

2. S (видимый), нм^{-1} , в диапазоне длин волн от 300 до 500 нм – спектральный угол наклона – определение характеристики источников ОРОВ в водном объекте. Так S (видимый) в диапазоне от 0,014 до 0,017 нм^{-1} является типичным значением для ОРОВ в пресных водоемах. Значения S выше 0,02 нм^{-1} свидетельствуют о преобладании автохтонного растворенного органического вещества, ниже – о преобладании аллохтонного (Helms et al., 2008).

3. S_r – коэффициент уклона спектральной кривой – отношение S (ультрафиолетовый) / S (видимый) может использоваться в качестве индикатора фотодеградаци (дает информацию о возрасте ОРОВ). Величина $S_r = 1,2$ – типичное значение S_r для поверхности пресной воды; $S_r < 1,2$ указывает на свежие и богатые гуминовыми кислотами наземные органические вещества; $S_r > 1,2$ может указывать на фотодегградацию (Skorospekhova et al., 2018).

4.1. Результаты анализа пробы воды с водных объектов Кольского полуострова (2019 г) и их интерпретация

Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона Sr для водоемов и водотоков на Кольском полуострове

Дата пробоотбора	Название объекта	α ОРОВ(440), нм ⁻¹	S (300-500), нм ⁻¹	Sr [S (УФ)/ S (видимый)]	Тип коэффициента уклона Sr
1	2	3	4	5	6
20.02.2019	оз. Большой Вудъявр	0,32	0,008	1,3	>1,2
20.02.2019	оз. Большой Вудъявр	0,79	0,010	1,2	=1,2
21.02.2019	оз. Малый Вудъявр	0,54	0,006	1,8	>1,2
21.02.2019	р. Саамка	11,29	0,004	1,5	>1,2
22.02.2019	оз. Куропачье	4,09	0,015	0,7	<1,2
23.02.2019	оз. Вите	0,88	0,012	0,9	<1,2
23.02.2019	оз. Сончъявр	1,14	0,011	1,1	<1,2
24.02.2019	р. Айкуайвенйок	0,19	0,006	1,1	<1,2
24.02.2019	оз. Большой Вудъявр	1,44	0,008	1,4	>1,2

Абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм в водах озер Кольского полуострова в 2019 году составила от 0,32 до 4,09 нм⁻¹. Максимальное значение было измерено для объекта оз. Куропачье (4,09 нм⁻¹), минимальное значение получено для оз. Большой Вудъявр (0,32 нм⁻¹). Медиана значений α ОРОВ(440) для озер региона составила 1,31 нм⁻¹.

Для рек максимум α ОРОВ(440) = 11,29 нм⁻¹ пришелся на р. Саамку; минимум - α ОРОВ(440) = 0,19 нм⁻¹ – на р. Айкуайвенйок.

Значение спектрального угла наклона S для озер колеблется в диапазоне от 0,006 до 0,015 нм⁻¹ – S для оз. Куропачье и оз. Малый Вудъявр соответственно. Величина 0,015 нм⁻¹ является типичной для пресноводных водоемов. Однако величины меньше 0,014 нм⁻¹, наблюдающиеся для

остальных озер, показывают преобладание наличия аллохтонного растворенного органического вещества, поступающего в водоёмы извне.

В случае двух рассматриваемых рек, значения S варьируются от 0,004 до 0,006 нм^{-1} , что дает такой же вывод, как для озер.

Максимальный коэффициент уклона S_r для озер составил 1,8 (оз. Малый Вудъявр). Минимальный – 0,6 (оз. Куропачье).

S_r для рек составил от 1,1 (р. Саамка) до 1,5 (р. Айкуайвенйок).

Определение типа коэффициента спектрального уклона для водных объектов обоих видов производилось непосредственно в таблице 1. При $S_r = 1,2$ (типичное значение S_r для поверхности пресной воды) ячейка не выделялась цветом; при $S_r < 1,2$ (указывает на свежие и богатые гуминовыми кислотами наземные органические материи) ячейка выделялась голубым цветом; при $S_r > 1,2$ (указывает на фотодеградацию) ячейка выделялась синим цветом.

Видно, что к типу $S_r > 1,2$ относятся озера Малый Большой Вудъявр, а также река Саамка – объекты, испытывающие достаточно высокую антропогенную нагрузку.

Для водных объектов остальных рассматриваемых регионов определение типа коэффициента спектрального уклона также производилось подобным образом.

4.2. Результаты анализа пробы воды с водных объектов дельты р. Лены (2016 и 2018 гг.) и их интерпретация

Полученные результаты по данным за 2016 год представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водоемов и водотоков дельты р. Лены (2016 г)

Дата пробоотбора	Название объекта	α ОРОВ(440), нм ⁻¹	S (300-500), нм ⁻¹	Sr [S (УФ)/ S (видимый)]	Тип коэффициента уклона Sr
1	2	3	4	5	6
10.04.2016	Главное русло, дно	1,49	0,02	0,9	<1,2
11.04.2016	Главное русло	1,60	0,02	0,9	<1,2
11.04.2016	Главное русло, поверхность	1,97	0,02	0,9	<1,2
12.04.2016	Главное русло, дно	1,71	0,02	0,9	<1,2
12.04.2016	Главное русло, поверхность	1,35	0,02	0,9	<1,2
17.04.2016	Оленекская протока, дно	1,27	0,02	0,9	<1,2
17.04.2016	Оленекская протока, поверхность	1,24	0,02	0,9	<1,2
20.04.2016	озеро Банное, поверхность	2,61	0,02	1,0	<1,2
20.04.2016	озеро Банное, поверхность	1,77	0,02	0,9	<1,2
21.04.2016	озеро №10, дно	0,98	0,02	1,0	<1,2
21.04.2016	озеро №10, поверхность	0,97	0,02	1,0	<1,2
21.04.2016	озеро Моло, дно	0,66	0,01	1,1	<1,2
22.04.2016	озеро Банное, дно	1,98	0,02	0,9	<1,2
22.04.2016	озеро №9	2,27	0,02	1,0	<1,2
22.04.2016	озеро №11	1,09	0,02	1,0	<1,2
22.04.2016	озеро Банное, дно	2,16	0,02	0,9	<1,2
22.04.2016	озеро Банное, поверхность	3,70	0,02	0,9	<1,2

1	2	3	4	5	6
22.04.2016	озеро Банное, дно	2,00	0,02	0,9	<1,2
22.04.2016	озеро Банное, поверхность	2,17	0,02	1,0	<1,2
22.04.2016	озеро Рыба, дно	1,10	0,02	1,0	<1,2
22.04.2016	озеро Рыба, поверхность	1,01	0,02	1,0	<1,2
09.04.2016	главное русло, лед	0,97	0,01	1,1	<1,2
09.04.2016	главное русло, лед	0,05	0,01	1,1	<1,2
09.04.2016	главное русло, поверхность	1,41	0,02	0,9	<1,2
09.04.2016	главное русло, снег	1,04	0,01	2,8	>1,2
17.04.2016	Оленекская губа, лед	1,02	0,01	1,6	>1,2
17.04.2016	Оленекская губа, лед	0,44	0,00	3,2	>1,2
17.04.2016	Оленекская губа, снег	0,65	0,01	1,9	>1,2
22.04.2016	озеро Моло, снег	0,74	0,00	2,2	>1,2
22.04.2016	озеро Банное, снег	6,46	0,01	1,4	>1,2
22.04.2016	озеро Банное, снег	2,94	0,01	1,3	>1,2
22.04.2016	озеро Моло, снег	1,01	0,01	1,3	>1,2

В данном случае отдельно были рассмотрены полученные параметры ОРОВ для озер, для рек, для льда с поверхности водных объектов и для снега.

Абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм в водах озер, расположенных в дельте Лены, в 2016 году составила от 0,66 до 3,70 нм⁻¹. Максимальное значение было измерено для объекта оз. Банное (поверхность) (3,70 нм⁻¹),

минимальное значение получено для оз. Моло (дно) ($0,66 \text{ нм}^{-1}$). Медиана значений $\alpha\text{ОРОВ}(440)$ для озер региона составила $1,75 \text{ нм}^{-1}$.

Для рек максимум $\alpha\text{ОРОВ}(440) = 1,97 \text{ нм}^{-1}$ – р. Лена (главное русло, поверхность); минимум - $\alpha\text{ОРОВ}(440) = 1,24 \text{ нм}^{-1}$ – на Оленекской протоке (поверхность). Медиана значений составила $1,51 \text{ нм}^{-1}$.

При рассмотрении $\alpha\text{ОРОВ}(440)$ для льда максимальное значение – $1,02 \text{ нм}^{-1}$ (Оленекская губа); минимальное – $0,05 \text{ нм}^{-1}$ (р. Лена, главное русло). Медиана получилась равной $0,62 \text{ нм}^{-1}$.

В случае проб снега максимум $\alpha\text{ОРОВ}(440)$ равен $6,64 \text{ нм}^{-1}$, минимум – $0,65 \text{ нм}^{-1}$, медиана – $2,14 \text{ нм}^{-1}$.

Значение спектрального угла наклона S для озер колеблется в диапазоне от $0,015$ до $0,019 \text{ нм}^{-1}$ – S для оз. Моло (дно), оз. Банное (поверхность) и для оз. №9 соответственно. Величины в общем являются типичными для пресноводных водоемов. В некоторых случаях они близки к $0,02$ (оз. №9), что может характеризовать автохтонное происхождение ОРОВ.

В случае рассматриваемых рек, значения S варьируются от $0,015$ до $0,018 \text{ нм}^{-1}$, что дает схожий вывод.

Для льда S находится в пределах от $0,003$ до $0,013 \text{ нм}^{-1}$, что позволяет судить об аллохтонном происхождении ОРОВ.

Диапазон значений S для снега составил от $0,004$ до $0,007 \text{ нм}^{-1}$, это позволяет сделать схожие выводы, как и для льда.

Максимальный коэффициента уклона Sr для озер составил $1,1$ (оз. Моло, дно). Минимальный – $0,9$ (оз. Банное, поверхность).

Sr для рек составил $0,9$.

Все реки и озера относятся к типу $Sr < 1,2$. Лед с поверхности главного русла реки лены относится также к типу $Sr < 1,2$, но лед с Оленекской губы, как и все пробы снега, был отнесен к типу $Sr > 1,2$.

Результаты анализа пробы воды за 2018 год представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водоемов и водотоков дельты р. Лены (2018 г)

Дата пробоотбора	Название объекта	α ОРОВ(440), нм ⁻¹	S (300-500), нм ⁻¹	Sr [S (УФ)/ S (видимый)]	Тип коэффициента уклона Sr
1	2	3	4	5	6
19.04.2018	озеро Банное, дно	1,00	0,018	1,0	<1,2
19.04.2018	озеро Банное, поверхность	1,22	0,017	1,0	<1,2
19.04.2018	озеро Банное, дно	9,51	0,011	1,0	<1,2
19.04.2018	озеро Банное, дно	11,16	0,010	1,0	<1,2
19.04.2018	озеро Банное, поверхность	4,66	0,018	0,8	<1,2
20.04.2018	озеро Рыба, дно	2,53	0,008	1,5	>1,2
20.04.2018	озеро Рыба, поверхность	1,01	0,017	1,0	<1,2
20.04.2018	Северо- Восточное озеро, дно	1,83	0,016	1,0	<1,2
20.04.2018	Северо- Восточное озеро, поверхность	1,70	0,016	1,0	<1,2
20.04.2018	озеро Северное, дно	1,48	0,012	1,3	>1,2
20.04.2018	озеро Северное, поверхность	1,34	0,014	1,2	<1,2
20.04.2018	Туматская протока, поверхность	2,58	0,017	0,8	<1,2
20.04.2018	Туматская протока, дно	3,44	0,015	0,9	<1,2
21.04.2018	главное русло, дно	1,98	0,017	0,8	<1,2

1	2	3	4	5	6
21.04.2018	главное русло, поверхность	2,09	0,017	0,8	<1,2
21.04.2018	главное русло, дно	2,85	0,014	0,9	<1,2
21.04.2018	главное русло, поверхность	2,21	0,016	0,8	<1,2
22.04.2018	главное русло	2,33	0,016	0,9	<1,2
23.04.2018	озеро Банное	2,21	0,016	0,8	<1,2
23.04.2018	Восточное озеро	1,53	0,015	1,0	<1,2
23.04.2018	озеро Моло, дно	0,91	0,012	1,3	>1,2
23.04.2018	озеро Моло, поверхность	1,08	0,011	1,4	>1,2
23.04.2018	озеро Южное	3,00	0,014	1,2	<1,2
24.04.2018	Быковская протока	2,44	0,015	0,9	<1,2
24.04.2018	Быковская протока	2,00	0,017	0,8	<1,2
24.04.2018	Быковская протка	2,44	0,015	0,9	<1,2
25.04.2018	Оленекская губа	2,87	0,015	0,9	<1,2

Для вод озер дельты Лены в 2018 году абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм составила от 0,91 до 11,16 нм⁻¹. Максимальное значение было измерено для оз. Банное (дно) (11,16 нм⁻¹), минимальное значение получено для оз. Моло (дно) (0,91 нм⁻¹). Медиана значений α ОРОВ(440) для озер региона составила 2,89 нм⁻¹.

Для рек максимум α ОРОВ(440) = 3,44 нм⁻¹ пришелся на Туматскую протоку (дно); минимум - α ОРОВ(440) = 1,97 нм⁻¹ – главное русло р. Лены (дно).

Значение спектрального угла наклона S для озер колеблется в диапазоне от 0,008 до 0,018 нм⁻¹ – S для оз. Рыба (дно) и оз. Банное (поверхность) соответственно. Величины в общем являются типичными для пресноводных водоемов.

Для рек, значения S варьируются от 0,014 до 0,017 нм^{-1} (главное русло), что дает такой же вывод, как для озер.

Максимальный коэффициент уклона Sr для озер составил 1,5 (оз. Рыба). Минимальный – 0,8 (оз. Банное).

Sr для рек составил от 0,8 до 0,9.

Значения для всех рек и большей части озер не превышают $Sr < 1,2$. К типу $Sr > 1,2$ были отнесены озера Рыба, Северное и Моло.

Кроме того, для зимних данных по ОРОВ в озерах дельты р. Лены было проведено их сравнение с опубликованными ранее (Skorospekhnova et al., 2018) данными для этого региона за летний период. Результат сравнения представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения параметров ОРОВ для $\alpha\text{ОРОВ}(440)$, S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для озер дельты р. Лены за подледный период и период открытой воды

Регион	$\alpha\text{ОРОВ}(440)$, нм^{-1}			S (300-500), нм^{-1}			Sr [S (УФ)]/ S (видимый)]			Тип коэффициента уклона Sr
	макс	мин	ср	макс	мин	ср	макс	мин	ср	
Дельта р. Лены, ледовый покров	4,66	0,97	1,96	0,019	0,011	0,016	1,4	0,8	1,0	<1,2
Дельта р. Лены, открытая вода	5,12	0,42	1,51	0,024	0,012	0,018	1,5	0,9	1,1	<1,2

По средним значениям параметра $\alpha\text{ОРОВ}(440)$ можно сказать, что он выше в подледный период, чем в период открытой воды. Это обуславливается прежде всего тем, что в это время озера переходят на грунтовое питание. По литературным данным (Китаев, Двинских 2016), наибольшая концентрация растворенной органики наблюдается в водоемах в весенний период, что соответствует срокам подледного пробоотбора – 19-25 апреля; а наименьшее приходится на летне-осенний период из-за действия биологического фактора. Однако, если судить по максимальным значениям, полученным для отдельных озер, видно, что для периода открытой воды они выше зимних. Это может быть связано с тем, что озера, для которых определены максимальные

значения, располагаются в непосредственной близости от болотных массивов. В таком случае в летний период они могут принимать с болот сток вод, насыщенных окрашенной растворенной органикой.

4.3. Результаты анализа пробы воды с водных объектов полуострова Ямал (2018 г) и их интерпретация

Полученные данные представлены в таблице 6.

Таблица 6

Значения параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водоемов и водотоков полуострова Ямал (2018 г)

Дата пробоотбора	Название объекта	α ОРОВ(440), нм ⁻¹	S (300-500), нм ⁻¹	Sr [S (УФ)/ S (видимый)]	Тип коэффициента уклона Sr
1	2	3	4	5	6
12.07.2018	озеро №1	2,07	0,016	0,9	<1,2
13.07.2018	озеро №2	8,81	0,017	0,7	<1,2
13.07.2018	озеро №3	4,06	0,018	0,9	<1,2
17.07.2018	оз. Теплое-1	2,33	0,016	1,1	<1,2
17.07.2018	оз. Теплое-2	2,81	0,015	1,0	<1,2
17.07.2018	озеро №4	2,54	0,015	1,0	<1,2
18.07.2018	озеро №5	8,13	0,016	0,8	<1,2
18.07.2018	озеро №6	10,92	0,014	0,7	<1,2
18.07.2018	озеро №7	2,17	0,016	0,9	<1,2
18.07.2018	озеро №8	11,52	0,015	0,7	<1,2
18.07.2018	озеро №9	8,70	0,014	0,7	<1,2
19.07.2018	озеро №10	10,47	0,015	0,8	<1,2
19.07.2018	озеро №11	4,60	0,016	0,8	<1,2
13.07.2018	р. Вындыда	10,42	0,016	0,7	<1,2
13.07.2018	р. Вындыда	9,67	0,016	0,7	<1,2
16.07.2018	река №1	14,15	0,016	0,5	<1,2
14.07.2018	р. Собь	0,33	0,013	0,9	<1,2
15.07.2018	р. Собь	0,32	0,013	0,9	<1,2
16.07.2018	р. Шайтанка	8,56	0,017	0,5	<1,2
17.07.2018	р. Шайтнака	7,32	0,017	0,7	<1,2

1	2	3	4	5	6
20.07.2018	р. Шайтанка	5,39	0,016	0,7	<1,2
20.07.2018	р. Шайтанка	10,41	0,016	0,7	<1,2
17.07.2018	р. Ханмей	0,33	0,015	0,8	<1,2
17.07.2018	р. Ханмей	0,41	0,014	0,9	<1,2

Для вод озер полуострова Ямал в 2018 году абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм составила от 2,07 до 11,52 нм⁻¹. Максимальное значение было измерено для озера №8 (11,52 нм⁻¹), минимальное значение получено для озера №1 (2,07 нм⁻¹). Медиана значений αОРОВ(440) для озер региона составила 6,09 нм⁻¹.

Для рек максимум αОРОВ(440) = 14,15 нм⁻¹ пришелся на реку №1; минимум - αОРОВ(440) = 0,32 нм⁻¹ – р. Собь.

Значение спектрального угла наклона S для озер колеблется в диапазоне от 0,014 до 0,018 нм⁻¹ – S для озер №6, 9 и озера №3 соответственно. Величины в общем являются типичными для пресноводных водоемов.

Для рек, значения S варьируются от 0,013 до 0,017 нм⁻¹ (главное русло), что дает такой же вывод, как для озер.

Максимальный коэффициент уклона Sr для озер составил 1,1 (оз. Рыба). Минимальный – 0,7 (оз. Банное).

Sr для рек составил от 0,5 до 0,9.

Значения для всех рек и озер не превышают Sr <1,2.

4.4. Сравнение содержания ОРОВ для трех рассматриваемых регионов

Таблица 7

Сводная таблица максимальных, минимальных и средних значений параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водоемов Кольского полуострова, полуострова Ямал и дельты р. Лена

Регион	α ОРОВ(440), нм ⁻¹			S (300-500), нм ⁻¹			Sr [S (УФ)/S (видимый)]			Тип коэффициента уклона Sr
	макс	мин	ср	макс	мин	ср	макс	мин	ср	
Кольский полуостров, 2019	4,09	0,32	1,31	0,015	0,006	0,010	1,8	0,7	1,2	=1,2
Дельта р. Лены, 2016	3,70	0,66	1,75	0,019	0,015	0,017	1,1	0,9	1,0	<1,2
Дельта р. Лены, 2018	11,16	0,91	2,89	0,018	0,008	0,014	1,5	0,8	1,1	<1,2
Полуостров Ямал, 2018	11,52	2,07	6,09	0,018	0,014	0,016	1,1	0,7	0,9	<1,2

Сопоставляя средние значения абсорбции α ОРОВ(440) года электромагнитного излучения на участке спектра 440 нм для водоемов дельты Лены за 2016 и 2018, можно сказать, что концентрация ОРОВ в воде возросла с 2,89 до 6,09 нм⁻¹ соответственно. Наклон спектральной кривой S уменьшился с 0,017 до 0,014 нм⁻¹, что, однако не выходит за пределы определенных типичных значений для пресных вод (0,014-0,017 нм⁻¹). Коэффициент уклона изменился с 1,0 до 1,1, но не перешел за порог Sr =1,2. Среднее значение α ОРОВ(440) = 1,33 нм⁻¹ для Кольского полуострова меньше, чем данные по дельте р. Лены. Величина угла наклона спектральной кривой также меньше S = 1,2 нм⁻¹. Однако здесь больше значение Sr = 1,2, оно равно типичному значению для пресных вод. Данные по Ямалу представляют наибольшие средние значения по рассматриваемым параметрам: α ОРОВ(440) = 6,09 нм⁻¹, S = 0,016 нм⁻¹. И наименьшее значение по параметру Sr = 0,9. Здесь воды относятся к типу содержащих свежее органическое вещество богатых

гуминовыми кислотами. Возможно, это объясняется сроками пробоотбора – пробы из регионов Кольского полуострова и дельты р. Лены были отобраны в зимний период, а пробы с полуострова Ямал – в летний. Полученный результат подтверждает, что концентрация растворенной органики в жидкой озерной воде в летнее и зимнее время может отличаться в разы (Дворников, личная консультация).

Таблица 8

Сводная таблица максимальных, минимальных и средних значений параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водотоков Кольского полуострова, полуострова Ямал и дельты р. Лена

Регион	α ОРОВ(440), нм ⁻¹			S (300-500), нм ⁻¹			Sr [S (УФ)/S (видимый)]			Тип коэффициента уклона Sr
	макс	мин	ср	макс	мин	ср	макс	мин	ср	
Кольский полуостров, 2019	11,29	0,19	5,74	0,006	0,004	0,005	1,5	1,1	1,3	>1,2
Дельта р. Лены, 2016	1,97	1,24	1,51	0,018	0,015	0,017	0,9	0,9	0,9	<1,2
Дельта р. Лены, 2018	3,44	1,98	2,42	0,017	0,014	0,016	0,9	0,8	0,9	<1,2
Полуостров Ямал, 2018	14,15	0,32	6,12	0,017	0,013	0,015	0,9	0,5	0,7	<1,2

Анализируя средние значения абсорбции α ОРОВ(440) года электромагнитного излучения на участке спектра 440 нм для водотоков дельты Лены за 2016 и 2018, можно сказать, что, как и в случае с озерами, концентрация ОРОВ в воде увеличилась: с 1,51 до 2,42 нм⁻¹ соответственно. Наклон спектральной кривой S тоже уменьшился, но менее значительно с 0,017 до 0,016 нм⁻¹, что также не выходит за пределы определенных типичных значений для пресных вод (0,014-0,017 нм⁻¹). Коэффициент уклона остался неизменно равным 0,9 и не перешел за порог Sr =1,2. Среднее значение α ОРОВ(440) = 5,74 нм⁻¹ для Кольского полуострова значительно больше, чем

данные по дельте р. Лены. Величина угла наклона спектральной кривой меньше: $S = 0,005 \text{ нм}^{-1}$. Кроме того, здесь больше значение $Sr = 1,3$, оно превышает типичное значение для пресных вод, что позволяет отнести воды к типу с возможной фотодеградацией. Данные по Ямалу представляют наибольшее среднее значение по $\alpha\text{ОРОВ}(440) = 6,12 \text{ нм}^{-1}$. Однако параметр S здесь меньше, чем в дельте Лены в оба года и составляет $0,015 \text{ нм}^{-1}$. Как и в случае для озер, здесь наблюдается наименьшее значение по параметру $Sr = 0,7$. Здесь воды относятся к типу содержащих свежее органическое вещество богатых гуминовыми кислотами. Это также объясняется тем, что пробы отбирались в летний период.

Также в ходе работы для удобства сопоставления были составлены таблицы (таблицы 9 и 10), где представлены обобщенные данные по дельте р. Лены за оба рассматриваемых года.

Таблица 9

Сводная таблица максимальных, минимальных и средних значений параметров ОРОВ для $\alpha\text{ОРОВ}(440)$, S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водоемов Кольского полуострова, полуострова Ямал и дельты р. Лены

Регион	$\alpha\text{ОРОВ}(440), \text{ нм}^{-1}$			S (300-500), нм^{-1}			Sr [S (УФ)/ S (видимый)]			Тип коэффициента уклона Sr
	макс	мин	ср	макс	мин	ср	макс	мин	ср	
Кольский полуостров, 2019	4,09	0,32	1,31	0,015	0,006	0,010	1,8	0,7	1,2	=1,2
Дельта р. Лены, 2016 и 2018	11,16	0,66	2,35	0,019	0,008	0,015	1,5	0,8	1,0	<1,2
Полуостров Ямал, 2018	11,52	2,07	6,09	0,018	0,014	0,016	1,1	0,7	0,9	<1,2

Таблица 10

Сводная таблица максимальных, минимальных и средних значений параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водотоков Кольского полуострова, полуострова Ямал и дельты р. Лена

Регион	α ОРОВ(440), нм ⁻¹			S (300-500), нм ⁻¹			Sr [S (УФ)/S (видимый)]			Тип коэффициента уклона Sr
	макс	мин	ср	макс	мин	ср	макс	мин	ср	
Кольский полуостров, 2019	11,29	0,19	5,74	0,006	0,004	0,005	1,5	1,1	1,3	>1,2
Дельта р. Лены, 2016 и 2018	3,44	1,24	2,04	0,018	0,014	0,016	0,9	0,8	0,9	<1,2
Полуостров Ямал, 2018	14,15	0,32	6,12	0,017	0,013	0,015	0,9	0,5	0,7	<1,2

Глава 5. Определение содержания ОРОВ в воде с применением данных дистанционного зондирования

5.1. Получение уравнения зависимости отношения зеленого и красного спектральных каналов и лабораторных данных по ОРОВ (по данным для полуострова Ямал)

Внешний вид одного из спутниковых снимков Sentinel-2A для части территории полуострова Ямал представлен на рисунке.

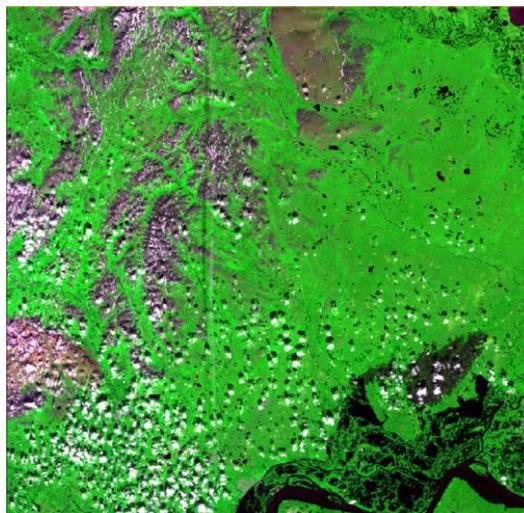


Рисунок 1 – Спутниковый снимок Sentinel-2A в (комбинация каналов: красный (B4), ближний инфракрасный (B8), синий (B2)) за 20.07.18, частично покрывающий территорию полуострова Ямал

Полученные в программе Sentinel application platform (SNAP) результаты определения отношения зеленого и красного спектральных каналов для водных объектов полуострова Ямал представлены в таблице 11.

Таблица 11

Результаты лабораторного определения концентрации α ОРОВ(440) для водных объектов полуострова Ямал и соответствующее им отношение зеленого (В3) и красного (В4) спектральных каналов

Название объекта	α ОРОВ(440) , нм ⁻¹	В3/В4
1	2	3
озеро №1	2,07	1,53
озеро №2	8,81	1,21
озеро №3	4,06	1,19
оз. Теплое-1	2,33	Сплошной облачный покров
оз. Теплое-2	2,81	Сплошной облачный покров
озеро №4	2,54	Сплошной облачный покров
озеро №5	8,13	1,03
озеро №6	10,92	1,22
озеро №7	2,17	1,51
озеро №8	11,52	1,08
озеро №9	8,70	1,12
озеро №10	10,47	1,02
озеро №11	4,60	1,09
р. Вындяда	10,42	Сплошной облачный покров
р. Вындяда	9,67	1,18
река №1	14,15	Сплошной облачный покров
р. Собь	0,33	1,35
р. Собь	0,32	1,48
р. Шайтанка	8,56	Сплошной облачный покров
р. Шайтнака	7,32	Сплошной облачный покров
р. Шайтанка	5,39	Сплошной облачный покров
р. Шайтанка	10,41	Сплошной облачный покров
р. Ханмей	0,33	1,57
р. Ханмей	0,41	1,40

Более наглядное сравнение измеренных концентраций ОРОВ на 440 нм для полуострова Ямал за 2019 год с рассчитанным отношением каналов зеленого и красного для снимков Sentinel-2A представлено на рисунке 2.

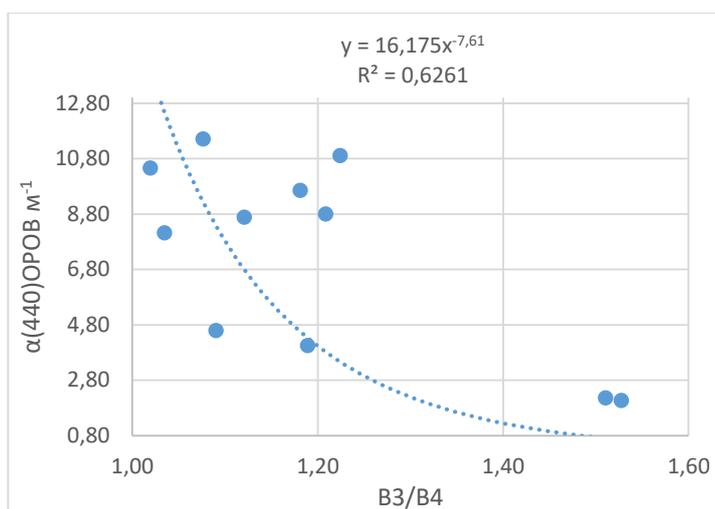


Рисунок 2 - Сравнение измеренных концентраций ОРОВ на 440 нм для полуострова Ямал за 2019 год с рассчитанным отношением каналов зеленого и красного для снимков Sentinel-2A

По данным Дворникова Ю.А., спектральные характеристики озер полуострова Ямала очень чувствительными к воздействию следующих факторов:

- 1) режиму перемешивания, который связан с погодными условиями (например, с сильными ветрами),
- 2) активности процессов в береговой зоне (например, термоденудация),
- 3) составу пород, преобладающему в прибрежных и донных отложениях (например, песок требует больше ветровой энергии для перемешивания по сравнению с глинами и илами),
- 4) объему воды в озере (площадь озера и его глубина).

Наличие таких факторов завышает коэффициент отражения и может привести к завышению концентрации ОРОВ (Griffin et al., 2011) и снижению корреляции между полевыми данными концентрации ОРОВ и данными, полученными со снимков.

В данном случае с использованием снимков Sentinel-2A получен достаточно высокий коэффициент детерминации 0,62. Ранее полученные коэффициенты детерминации данных измеренных концентраций ОРОВ с рассчитанным отношением каналов (Дворников, 2016) для данного региона

составляли 0,68 (сравнение измеренных концентраций ОРОВ на 440 нм за 2014 год (с добавлением данных 2013 года) с рассчитанным отношением каналов зеленого и красного для комбинации снимков GeoEye-1 2013-07-05 и WorldView-2 2013-07-21) и 0,82 (сравнение измеренных концентраций ОРОВ на 440 нм за 2011 год с рассчитанным отношением каналов зеленого и красного для снимков GeoEye-1 2009-08-15). Это говорит о том, что полученная зависимость:

$$y = 16,175x^{-7,61},$$

может быть использована для дистанционного определения значений содержания ОРОВ в водных объектах Арктики.

5.2. Апробация полученного уравнения связи на водных объектах Кольского полуострова с известными значениями концентрации ОРОВ за 2016 год

С целью оценки применимости полученного уравнения связи с его помощью было произведено определение содержания ОРОВ в водных объектах дельты полуострова Ямал для летнего периода 2016 года.

По двум спутниковым снимкам Sentinel-2A (один из использованных снимков представлен на рисунок 3) в программе Sentinel application platform (SNAP), как ранее было выполнено для водных объектов полуострова Ямал за 2018 год, было посчитано отношение зеленого и красного спектральных каналов. Использовались снимки, полученные за даты максимально близкие к срокам пробоотбора, который проводился в период с 10 по 16 июня 2016 года. Также критерием выбора снимков была облачность – брались снимки, для которых облачность составляла меньше 10%. В итоге, снимки были взяты за даты 20 и 23 июня 2016 года.

По полученным таким образом значениям с помощью уравнения связи был произведен расчет концентрации ОРОВ для водоемов и водотоков полуострова Ямала за 2016 год. Спрогнозированные значения вместе со значениями, измеренными для данных объектов в лабораторных условиях, представлены в таблице 12.

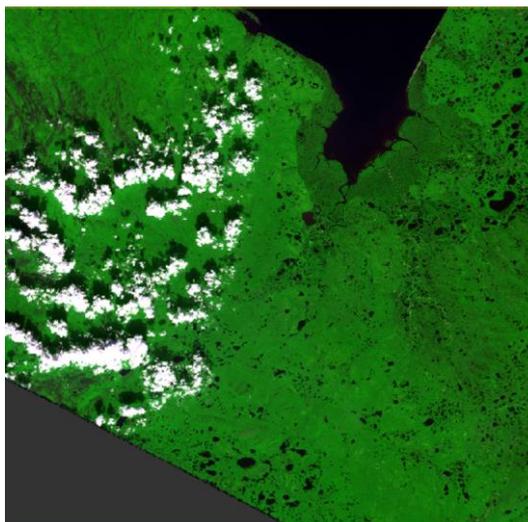


Рисунок 3 – Спутниковый снимок Sentinel-2A (комбинация каналов: красный (B4), ближний инфракрасный (B8), синий (B2)) за 20.06.16, частично покрывающий территорию полуострова Ямал

Таблица 12

Спрогнозированные значения концентрации ОРОВ для водных объектов полуострова Ямал за 2016 год и их сопоставление с данными лабораторного измерения ОРОВ

Название объекта	Отношение зеленого и красного спектральных каналов	α ОРОВ(440), нм^{-1} , полученное по уравнению связи	α ОРОВ (440), нм^{-1} , полученное при лабораторных измерениях
оз. №1	1,11	7,49	8,87
руч. Восточный Нырдовоменшор	1,20	3,98	0,51
р. Собь	1,53	0,62	0,35
оз. №2	1,67	0,33	0,35
болото №1	1,52	0,67	0,32
р. Немурьегай	1,22	3,61	3,87
оз. Юнто	1,27	2,69	3,89
оз. Ямбуто	1,31	2,08	3,32
лайда №1	1,28	2,40	6,74
оз. №4	1,34	1,71	2,87
р. Еркута	1,26	2,75	3,73
оз. №5	1,14	6,14	7,16
лайда №2	1,29	2,32	5,10
оз. Пыряюн	1,25	2,99	7,47

Сравнивая полученные значения, можно сказать, что, в целом, результаты применения уравнения связи можно признать удовлетворительными. Для 8 из 14 рассматриваемых случаев содержание ОРОВ, измеренное в лабораторных условиях, отличается от полученного по уравнению связи меньше чем в 2 раза (значения ОРОВ для этих озер в таблице 11 выделены зеленым цветом). В частности, видно, что в некоторых случаях оба значения очень близки (например, оз. №2). Однако, для 5 случаев значения различаются больше чем в два раза (значения ОРОВ для этих озер в таблице 11 выделены красным цветом). Озеро №4 (значения ОРОВ для него в таблице 11 выделены желтым цветом), занимает пограничное положение между двумя сформировавшимися группами удовлетворительных и неудовлетворительных значений определения ОРОВ по уравнению связи. Для данного озера значения расходятся чуть больше, чем в два раза.

Заключение

В результате проделанной работы получены следующие выводы:

1) Для озер Кольского полуострова значение α ОРОВ(440) в среднем равно $1,31 \text{ нм}^{-1}$. ОРОВ во всех рассмотренных водных объектах данного региона по основному источнику поступления является аллохтонным ($S < 0,02 \text{ нм}^{-1}$). Для рек значения α ОРОВ(440) в среднем составляет $5,74 \text{ нм}^{-1}$. В них присутствуют процессы фотодеградации ($Sr > 1,2$).

2) Озера дельты р. Лены характеризуются средним значением α ОРОВ(440) $2,35 \text{ нм}^{-1}$. Для реки данного региона в среднем значение α ОРОВ(440) равно $2,04 \text{ нм}^{-1}$. Характерно преобладание аллохтонного ОРОВ ($S < 0,02 \text{ нм}^{-1}$). Воды всех рассмотренных объектов богаты гуминовыми кислотами и поступающими с поверхности водосборов органическими веществами ($Sr < 1,2$);

3) В озерах полуострова Ямал среднее значение α ОРОВ(440) составило $6,09 \text{ нм}^{-1}$, а в реках – $6,12 \text{ нм}^{-1}$. Во всех водных объектах преобладает аллохтонное ОРОВ ($S < 0,02 \text{ нм}^{-1}$). Выявлено, что воды всех рассмотренных объектов насыщены поступающими с земной поверхности органическими веществами и гуминовыми кислотами ($Sr < 1,2$);

4) При рассмотрении сезонной динамики ОРОВ в водах озер дельты р. Лены подтверждено, что на содержание ОРОВ в воде могут сильно влиять не только общие факторы, как переход озер на питание исключительно грунтовыми водами в период стояния сплошного ледового покрова на поверхности воды, но также местные особенности отдельных объектов – например, поступление насыщенных растворенной органикой болотных вод в период открытой воды. Это подводит к необходимости разработки индивидуального подхода к объектам исследования и рассмотрению влияния на них местных факторов, которое может быть весьма значительным.

5) По итогам сравнения содержания ОРОВ в водных объектах трех регионов получено, что максимальные значения характерны для полуострова

Ямал, а минимальные – для Кольского полуострова при рассмотрении озер или для дельты р. Лены при рассмотрении рек.

В случае как для озер, так и для рек, максимум значений пришелся на полуостров Ямал. Полученный результат можно объяснить сроками пробоотбора. Пробы там отбирались в период открытой воды, когда озера в условиях активизации процессов термоденудации и термоэрозии в криолитозоне при положительных температурах активно принимают поступление аллохтонного вещества с поверхностей их водосборов. То, что по полученным для рек данным следующим по величине содержания ОРОВ в воде идет Кольский полуостров, обуславливается местами расположения точек пробоотбора – пробы отбирались из рек, принимающих стоки промышленных предприятий. Так, например, р. Саамка, для которой измерена максимальная величина концентрации ОРОВ, испытывает сильное загрязнение шахтными водами, поступающими с рудника Кировского комбината "Апатит". Сбросы увеличивают содержание ОРОВ в воде.

В свою очередь, наблюдаемая ситуация для озер объясняется, опять же, местами отбора проб. Значения для Кольского полуострова ниже, чем для дельты р. Лены, поскольку пробы отбирались в местах с невыраженным антропогенным воздействием. В целом же, для озер Кольского полуострова в естественных условиях содержание ОРОВ должно быть ниже, так как здесь отсутствует приток богатых растворенной органикой болотных вод, характерный для отдельных озер дельты р. Лены в летний период.

б) Применение данных дистанционного зондирования для определения содержания ОРОВ в водных объектах может дать удовлетворительные результаты, что подтверждено апробацией полученного на основе данных по полуострову Ямалу уравнения связи на водоемах и водотоках полуострова с известными значениями содержания ОРОВ за 2016 год. Однако приведенная в работе методика все же нуждается в доработке и дополнительной проверке на других водных объектах. При получении в дальнейшем достоверных результатов, определение содержания ОРОВ в воде может стать

перспективным методом для ведения дистанционного мониторинга ОРОВ в водных объектах.

Список литературы

1. Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
2. Верес Ю.К., Остапеня А.П. Содержание лабильного органического вещества в воде озер Нарочанской группы // Вестник БГУ. Сер. 2. № 2. 2011 г. – Мн., БГУ. – С. 45-49.
3. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования (под ред. Н.И. Алексеевского). – М.: ГЕОС, 2007. – 585 с.
4. Губернаторова Т. Н. Деграция стойкого органического вещества в водных экосистемах под действием микроорганизмов (обзор)/Т. Н. Губернаторова, М. И. Дину // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование, 2015. т.Т. 1, N № 2 (2).- С.31-38
5. Дворников Юрий Александрович. Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворённому органическому веществу: диссертация ... кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Дворников Юрий Александрович; [Место защиты: Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук]. - Тюмень, 2016.- 177 с.
6. Дмитриев В.В. Оценка экологического состояния природных объектов. Что такое экологическая оценка и как построить интегральный показатель состояния природной экосистемы. Экология. Безопасность. Жизнь. Экологический опыт гражданских, общественных инициатив. Выпуск 12. Гатчина, 2001 г, с. 225-237.
7. Исидоров В.А. Экологическая химия. Учебник. — СПб.: Химиздат, 2001. — 304 с.
8. Китаев А.Б., Двинских С.А. Внутригодовая динамика биогенных веществ в камских водохранилищах // Географический вестник. 2016. №1(36). С. 87-94.

9. Кольская энциклопедия. В 5 т. Т. 2. Е — К / Гл. ред. А.Н. Виноградов. — СПб. : ИС ; Апатиты : КНЦ РАН, 2009. — С. 357.
10. Моисеенко Т.И. Водная токсикология: фундаментальные и прикладные аспекты. М.: Наука. 2009. 400 с.
11. Моисеенко Т.И., Родюшкин И.В., Даувальтер В.А., Кудрявцева Л.П. Формирование качества поверхностных вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водосборы арктического бассейна. Апатиты. Изд-во КНЦ РАН. 1996. 263 с.
12. Расчет глубины протаивания многолетнемерзлых пород на примере о. Самойловского (дельта реки Лена) / Н. Н. Огородникова, И. В. Федорова // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: материалы IV шк.-конф. молодых ученых с междунар. участием (26-28 авг. 2011 г.). - Петрозаводск, 2011. - С. 29-33. - Библиогр.: с. 33 (5 назв.)
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. Выпуск 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Ленинград. Гидрометиздат, 1964.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 01. Кольский полуостров. Под ред. Елшина Ю.А. и канд. географ. наук Куприянова В.В. Монография. - Л.: Гидрометиздательство, 1970. - 316с.
15. Рихтер Г.Д. Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. Л.: Гостехтеориздат, 1934. 144 с.
16. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане / Е. А. Романкевич. – М.: Наука, 1977. – 256 с.
17. Семенов А. Д., Евстифеев М. М., Гаврилко Ю. М. Методические указания к практикуму «Анализ объектов окружающей среды». Определение биогенных элементов в природных водах. Часть 4. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2001. — 15 с.
18. Скопинцев, Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) / Б.А. Скопинцев // Тр. ГОИН. – 1950. – Т.17(29). – 290 с.

19. Тимофеев Д.А. Некоторые общие вопросы неотектоники и морфогенетики на примере геоморфологической истории Южной Якутии // Проблемы геоморфологии и неотектоника ороген. областей Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1968. - Т.2. - С.235-244.
20. Тюменцева, Е. Ю. Т 20. Экология: учебное пособие / Е. Ю. Тюменцева, В. Л. Штабнова. –2-е изд., исправл. и доп. – Омск: Омский государственный институт сервиса, 2013. – 92 с.
21. Экология нефтегазового комплекса [Текст]: учеб. пособие. В 2 т / под общ. ред. А.И. Владимирова, В.В. Ремизова. - М. : [б. и.], 20 - . Т. 1 / Э.Б.Бухгалтер, И.А.Голубева, О.П.Лыков и др. - 2003. - 415 с.
22. Эрозионные процессы Центрального Ямала : [Монография] / [А. Ю. Сидорчук, А. В. Баранов]; Под ред.: А. Ю. Сидорчука, А. В. Баранова. - СПб., 1999. - 349 с.
23. Brezonik P., Menken K.D., Bauer M. Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM) // Lake Reservoir Manage. – 2005. - №21(4). – P. 373–382. - doi:10.1080/07438140509354442.
24. Bricaud A., Morel A., Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains // Limnol. Oceanogr. – 1981. - №26. – P. 43-53.
25. Carder K.L., Steward R.G., Harvey G.R., Ortner P.B. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // Limnol. Oceanogr. – 1989. - №34. – P. 68–81.
26. Engstrom D.R. Influence of vegetation and hydrology on the humus budgets of Labrador lakes // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 1987. - №44. – P. 1306-1314.
27. Gjessing, E.T. Physical and chemical characteristics of aquatic humus // Ann Arbor Science Publishers. – 1976. – 120 p.
28. Griffin C.G., Frey K. E., Rogan J., Holmes R. M. Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia,

- observed using satellite imagery // Journal of Geophysical Research. – 2011. - №16. - G03018. - doi:10.1029/2010JG001634.
29. Helms, J.R., Stubbins, A., Ritchie, J.D., Minor, E.C., Kieber, D.J. & Mopper, K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnol. Oceanogr. – 2008. - №53. – P. 955–969.
30. <http://docs.cntd.ru/document/1200005823> - ГОСТ 17.1.1.02-77 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Классификация водных объектов (с Изменением N 1)
31. <http://docs.cntd.ru/document/1200097407> - ГОСТ 31868-2012 Вода. Методы определения цветности
32. <http://docs.cntd.ru/document/1200105923> - ГОСТ Р 55684-2013 (ИСО 8467:1993) Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости
33. <http://docs.cntd.ru/document/1200107611> - ГОСТ 32427-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение биоразлагаемости: 28-дневный тест
34. <http://docs.cntd.ru/document/gost-17-1-3-07-82> - ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков
35. <http://docs.cntd.ru/document/gost-31859-2012> - ГОСТ 31859-2012. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. ВОДА
36. http://gidrohim.com/sites/default/files/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%202017_0.pdf - Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник, 2017. Главный редактор - кандидат биологических наук М.М. Трофимчук, Ростов-на-Дону, 2018, ФГБУ "Гидрохимический институт", Росгидромет.
37. Jerlov N.G. Optical oceanography.- Elsevier: Amsterdam. – 1968. – 194 p.

38. Kalle K. The problem of gelbstoff in the sea // *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* – 1966. - №4. – P. 91-104.
39. Kutser T., Pierson D.C., Kallio K., Reinart A., Sobek S. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing // *Remote Sens. Environ.* – 2005a. - №94. – P. 535–540. - doi:10.1016/j.rse.2004.11.009.
40. Kutser T., Pierson D.C., Tanvik L., Reinart A., Sobek S., Kallio K. Using satellite remote sensing to estimate the colored dissolved organic matter absorption coefficient in lakes // *Ecosystems.* – 2005b. - №8. – P. 709–720. - doi:10.1007/s10021-003-0148-6.
41. Skorospekhova, Tatiana; Heim, Birgit; Fedorova, Irina; Morgenstern, Anne; Eulenburg, Antje; Alekseeva, Natalia; Evdokimov, Alexander; Chetverova, Antonina; Romanov, Stephan (2017): Colored dissolved organic matter (CDOM) absorption measurements of lakes in the Lena River Delta, Eastern Siberia, 2013-2016. Otto Schmidt Labor, Alfred Wegener Institute, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.875770>
42. Stedmon, C.A., Markager, S., Kaas, H., 2000. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 51, 267 – 278.
43. Tatiana Skorospekhova, Birgit Heim, Antonina Chetverova, Irina Fedorova, Natalia Alekseeva, Olga Bobrova, Yury Dvornikov, Antje Eulenburg, Sebastian Rössler and Anne Morgenstern. Coloured Dissolved Organic Matter Variability in Tundra Lakes of the Central Lena River Delta (N-Siberia) // *Polarforschung.* 2018. T. 87. № 2. C. 125–133. - doi:10.2312/polarforschung.87.2.125
44. Twardowski M.S., Boss E., Sullivan J.M., Donaghay P.L. Modeling spectral absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) // *Mar. Chem.* – 2004. - №89. – P. 69-88. - doi:10.1016/j.marchem.2004.02.008.
45. Twardowski M.S., Donaghay P.L. Separating in situ and terrigenous sources of absorption by dissolved material in coastal waters // *Journal of Geophys. Res.* – 2001. - №106. – P. 2545-2560.

46. Twardowski M.S., Lewis M.R., Barnard A.H., Zaneveld J.R.V. In-water instrumentation and platforms for ocean color remote sensing applications.- In: R.L. MILLER et al (eds): Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments. Springer: Dordrecht, Netherlands. – 2005. – P. 69–100. - doi:10.1007/978-1-4020-3100-7_4.
47. Vincent W.F., Pienitz R. Sensitivity of high latitude freshwater ecosystems to global change: temperature and solar ultraviolet radiation // Geosci. Can. – 1996. - №23. – P. 231–236.
48. Wetzel R.G. Limnology: Lake and River Ecosystems. Academic Press. – 2001. – P. 731-759.
49. Zaneveld J.R.V. Penetration of ultraviolet radiation into natural waters // In: Impacts of Climatic Change on the Biosphere. Dept. of Transportation Climatic Assessment Program, Monogr. – 1975. - №5. – P. 2-108–2-166.