

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*



**Дворников Юрий Александрович**

**ПРОЦЕССЫ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ И ИХ  
ИНДИКАЦИЯ ПО РАСТВОРЕННОМУ ОРГАНИЧЕСКОМУ  
ВЕЩЕСТВУ**

Специальность 25.00.08 – инженерная геология,  
мерзлотоведение и грунтоведение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте криосферы Земли СО РАН

Научный руководитель: **Лейбман Марина Оскаровна**  
доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник Института  
криосферы Земли СО РАН

Научный консультант: **Хомутов Артем Валерьевич**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник Института  
криосферы Земли СО РАН

Официальные оппоненты: **Бешенцев Владимир Анатольевич**  
доктор геолого-минералогических наук,  
ФГБОУ ВО «Тюменский государственный  
нефтегазовый университет», профессор  
кафедры Геологии месторождений нефти и  
газа, г. Тюмень

**Орлов Тимофей Владимирович**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
ФГБУН Институт геоэкологии им. Е.М.  
Сергеева РАН, г. Москва, старший научный  
сотрудник

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский  
государственный университет имени  
М.В. Ломоносова»**

Защита состоится « 25 » мая 2016 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 003.042.02 при Институте криосферы Земли СО РАН по адресу: Россия, Тюмень, ул. Малыгина, 86.

Автореферат размещен на интернет-сайтах Института криосферы Земли СО РАН [http://www.ikz.ru/about/dissertation\\_council](http://www.ikz.ru/about/dissertation_council) и Министерства образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru>. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института криосферы Земли СО РАН по адресу: Россия, Тюмень, ул. Таймырская, 74 и на сайте ИКЗ СО РАН [http://www.ikz.ru/about/dissertation\\_council](http://www.ikz.ru/about/dissertation_council)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 625000, Россия, Тюмень, а/я 1230, ученому секретарю диссертационного совета Д 003.042.02 Якимову А.С., а также по электронной почте: [sciensec@ikz.ru](mailto:sciensec@ikz.ru)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук



А.С. Якимов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Резкая активизация рельефообразующих криогенных процессов на полуострове Ямал последние годы ставит задачу поиска средств мониторинга этих процессов. Существующие методы непосредственного измерения в полевых условиях и сопоставления изображений на разновременных космических снимках осложнены высокой стоимостью как полевых работ, так и космических снимков высокого разрешения. Поиск относительно доступных методов наблюдения за активизацией криогенных процессов и других изменений поверхности представляется актуальной задачей.

Озера — это природные резервуары, в которых происходит аккумуляция вещества, сносимого с окружающих их водосборных бассейнов. В связи с этим мы рассматриваем озера Ямала как четкий индикатор изменений поверхности, связанных с активностью криогенных процессов и общей динамикой ландшафтов.

Один из компонентов озерной воды – растворенное органическое вещество (**РОВ**). Количество аллохтонного РОВ зависит как от относительно неизменных или мало меняющихся факторов (например, рельеф, растительность), так и от активно меняющихся, к которым в первую очередь относятся процессы термоденудации. РОВ характеризуется возможностью его изучения несколькими методами: полевыми, лабораторными, и дистанционными. Применение комплекса различных методов позволяет использовать РОВ для количественной оценки процессов термоденудации.

Активность термоденудации и темпы формирования термоцирков являются геориском и дистанционный мониторинг этого процесса значительно облегчает задачу оценки и предотвращения этого риска. **Целью работы** является установление связи развития процессов термоденудации с концентрацией РОВ в озерной воде, а также влияния на

этот показатель климатических флуктуаций, особенностей растительного покрова, геоморфологических условий и морфометрических характеристик озерных котловин и их водосборных бассейнов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Характеристика термоцирков ключевого участка, их распространение и криолитологическое строение.
2. Совершенствование комплекса полевых, лабораторных и дистанционных методов изучения РОВ в озерах Ямала.
3. Создание методики картографирования водосборных бассейнов и распределения по площади мощности снежного покрова и его водного эквивалента путем усовершенствования цифровых моделей рельефа (ЦМР), построенных на основе радарной интерферометрии.
4. Разработка алгоритмов картографирования кустарниковой растительности по материалам дистанционного зондирования с калибровкой материалами полевой съемки.
5. Изучение факторов, влияющих на концентрацию РОВ в озерах Ямала, а именно: рельефа, растительности, снежного покрова, климатических флуктуаций, активности рельефообразующих криогенных процессов, с применением комплекса полевых, лабораторных и дистанционных методов, а также моделирования.
6. Разработка структуры и ведение базы геоданных для обработки результатов полевых, лабораторных и дистанционных исследований, которая легла в основу специализированной географической информационной системы (ГИС) исследуемого района.
7. Разработка статистической модели влияния исследованных природных факторов на концентрацию РОВ в озерах Ямала.
8. Оценка развития термоденудационных форм (термоцирков) во времени с момента образования, и изменение концентрации РОВ в озерах, береговая линия которых нарушена этими процессами.

**Личный вклад автора.** Работа выполнена при непосредственном участии автора в полевых и камеральных исследованиях. Автором отобрано более 200 проб на содержание РОВ, растворенного органического углерода (РОУ), а также взвешенных веществ из 64 озер на стационаре «Васькины Дачи» (Центральный Ямал), а также на участке Новый Порт (Восточный Ямал) и Варандей (Ненецкий АО) для сравнения с данными по основной площадке на Центральном Ямале. Пробы воды проанализированы автором самостоятельно на специальном оборудовании в лаборатории им. Отто Шмидта, ААНИИ (2011-2015). Автором обработано 7 космических снимков от получения исходных материалов до получения продуктов в виде геоданных – слоев базы данных ГИС. Автор проводил геодезические измерения (2011, 2014) в целях детальной съемки местности, и геометрической коррекции данных дистанционного зондирования (ДЗ), мониторинга процессов; батиметрические исследования (2012, 2014, 2015) для детального изучения дна озер (всего 19 озер); снегомерные наблюдения (2013) в целях установления закономерностей распределения снежного покрова в тундре. Результатом статистической обработки данных снегомерной съемки автором была построена модель распределения водного эквивалента снежного покрова на основе ГИС. Также автор принимал участие в работах по мониторингу сезонноталого слоя (СТС) и температуры пород (2011-2015) по программам Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) и Thermal State of Permafrost (TSP). Автор принимал активное участие в реализации совместного российско-австрийского проекта РФФИ «Комплексирование полевых и дистанционных методов мониторинга динамики поверхности и многолетнемерзлых пород на Ямале» 2013-2015, а также является главным исполнителем российско-германского проекта POLYAR (процесс транспорта органического вещества в озера Ямала) 2014-2016.

**Научная новизна:**

1. Определены количественные характеристики динамики термоденудационных форм рельефа (термоцирков) с применением космических съемок сверхвысокого разрешения, с калибровкой полевой тахеометрической и DGPS съемками форм рельефа.
2. Усовершенствован комплекс полевых, лабораторных и дистанционных методов изучения РОВ в озерах Ямала. Впервые в таком объеме и комбинации методы приложены к изучению озер как природных резервуаров, в которых происходит аккумуляция вещества, сносимого с окружающих их водосборных бассейнов. Одновременно комплекс методов применен к исследованию параметров криолитозоны и ландшафтов, являющихся и факторами, влияющими на РОВ, и объектами мониторинга.
3. Создана методика картографирования водосборных бассейнов озер и распределения по площади мощности снежного покрова и его водного эквивалента путем усовершенствования ЦМР, построенных на основе радарной интерферометрии, калиброванных наземной высокоточной тахеометрической съемкой.
4. Найдены алгоритмы картографирования кустарниковой растительности по материалам дистанционного зондирования с калибровкой материалами полевой съемки. Статистическими методами установлено, что растительность является одним из ведущих факторов изменения концентрации РОВ в озерной воде.
5. Разработана принципиально новая ГИС-ориентированная структура базы геоданных, которая позволила совмещать, накапливать и обрабатывать одновременно наборы разноплановых материалов полевых, лабораторных и дистанционных исследований, имеющих разное пространственное и временное разрешения, векторных и

скалярных, для выявления и количественной оценки взаимодействия параметров природной среды.

6. Для исследования содержания органического вещества в озерах применен бассейновый подход анализа взаимодействия параметров природной среды. На этой основе разработана статистическая модель, позволившая количественно оценить влияние основных факторов, определяющих концентрацию РОВ в озерах Ямала. Установлено, что из 19 рассмотренных факторов, основными являются 5, к которым относятся (1) соотношение площадей озера и водосборного бассейна, (2) высота уреза воды озера, (3) количество снега в водосборном бассейне, (4) активность термоденудации, и (5) продуктивность растительного покрова. Достоверность модели  $R^2=0,6$ .
7. Определена роль процессов термоденудации в изменении состояния озер. Образование термоцирков и криогенных оползней приводит к заметному увеличению концентрации ОРОВ в озерах, которая, в дальнейшем, уменьшается вместе с затуханием самого процесса термоденудации.

**Практическая значимость.** Использование методики обработки дистанционных материалов существенно сокращает затраты на мониторинг опасных криогенных процессов. Полученные в результате исследований база данных, статистические модели и сведения о пространственной дифференциации факторов природной среды, влияющих на активизацию опасных криогенных процессов и на формирование и динамику температурного поля пород, могут быть использованы при планировании и проектировании в районах освоения севера Западной Сибири и других равнинных районах Арктики.

**Основные защищаемые положения:**

1. Климатические изменения и связанная с этим активизация опасных криогенных процессов приводят к значительному увеличению

концентрации РОВ аллохтонного происхождения в озерах Ямала. Пик повышения концентрации наблюдается в первый год после активизации процесса термоденудации в водосборном бассейне конкретного озера и затухает во времени.

2. Факторами, определяющими концентрацию РОВ для совокупности исследованных озер Ямала, как показал расширенный регрессионный анализ, являются: 1) соотношение площадей озера и водосборного бассейна (доля 26,8%), 2) высота уреза воды озера (доля 26%), 3) количество снега в водосборном бассейне (доля 26%), 4) активность термоденудации (доля 12,8%, в массив данных вошли как пораженные термоденудацией, так и не пораженные озера), 5) продуктивность растительного покрова (доля 6,6%). Для конкретного озера доля термоденудации может быть выше или ниже в зависимости от пораженности берегов этим процессом. В озерах с берегами, пораженными термоденудацией, содержание РОВ в 2-3 раза выше, чем в озерах со стабильными берегами.
3. Методика картографирования водосборных бассейнов и распределения по площади мощности снежного покрова и его водного эквивалента путем усовершенствования ЦМР, построенных на основе радарной интерферометрии, калиброванных наземной высокоточной тахеометрической съемкой с использованием автоматических процедур и экспертных оценок.

**Достоверность и апробация работы.** Данные, полученные в ходе работы над диссертацией, являются достоверными, поскольку получены с учетом общепринятых стандартов, а также опыта предыдущих исследователей. Лабораторные исследования проведены в сертифицированной лаборатории на поверенном оборудовании, перед использованием которого всегда проводилась калибровка. Данные, полученные из материалов космической съемки были сопоставлены с



накопленным массивом полевых данных. ДДЗ проходили необходимые процедуры коррекции (геометрическая, радиометрическая, атмосферная). Батиметрические данные подкреплены результатами измерений глубин при помощи лота. Модели калибровались данными наземных наблюдений. Основные результаты докладывались на следующих международных и общероссийских конференциях: 1) 2012-02 ESA DUE Permafrost workshop (Potsdam, Germany); 2) 2012-05 12<sup>th</sup> International Circumpolar Remote Sensing Symposium (Levi, Finland); 3) 2012-06 Десятая международная конференция по мерзлотоведению (Салехард, Россия); 4) 2013-06 Геокриологическое картографирование (Москва, Россия); 5) 2013-09 Earth Cryology XXI century (Pushchino, Russia); 6) 2013-10 Современные и прогнозируемые изменения природных условий в высоких широтах (Сочи, Россия); 7) 2013-10 АК Permafrost (Salzburg, Austria); 8) 2014-02 ESA DUE Permafrost workshop (Frascati, Italy); 9) 2014-06 European Conference on Permafrost 4 (Evora, Portugal); 10) 2014-06 REKLIM conference (Berlin, Germany); 11) 2014-12 Arctic Change 2014 (Ottawa, Canada); 12) 2015-04 Arctic Science Summit Week 2015 (Toyama, Japan); 13) 2015-05 36<sup>th</sup> International Symposium Remote Sensing of Environment (Berlin, Germany); 2015-07 IV Всероссийский научный молодежный форум геокриологов, посвященный 200-летию со дня рождения академика А.Ф. Миддендорфа (Якутск, Россия); 14) 2016-01 Arctic Frontiers 2016 (Tromso, Norway).

Результаты работы опубликованы в 4 рецензируемых статьях, 2 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в изданиях, включенных в список цитирования Scopus, 1 – в издании, включенном в список цитирования Web of Science.

#### **Структура диссертации:**

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Выводов. Она изложена на 176 страницах, сопровождается 19 таблицами, 51

иллюстрацией и 8 приложениями. Список литературы включает 181 наименование.

### **Благодарности:**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. Марине Оскаровне Лейбман и научному консультанту к.г.-м.н. Артему Валерьевичу Хомутову за помощь в подготовке диссертации и за ценнейшие советы по теме исследования, за помощь в разработке структуры диссертации, сотрудникам Института криосферы Земли СО РАН Дамиру Раисовичу Мулланурову и к.г.н. Ксении Алексеевне Ермохиной за помощь в сборе полевых данных на Центральном Ямале, к.т.н. Анатолию Анатольевичу Губарькову (ТюмГНГУ) за помощь в сборе данных на площадках Новый Порт и Варандей, а также за ценные советы по теме работы. Автор выражает благодарность научному сотруднику Института полярных и морских исследования им. Альфреда Вегенера доктору Биргит Хайм за помощь в сборе полевых данных и их обработке, обработке ДДЗ, доктору Аннетт Бартч и Барбаре Уидхельм за помощь в обработке радарных снимков и подготовке ЦМР. Отдельную благодарность автор выражает коллективу лаборатории им. Отто Шмидта (ААНИИ) к.г.н. Ирине Викторовне Федоровой, к.х.н. Елене Дмитриевне Добротиной, Татьяне Викторовне Скороспеховой, Антонине Александровне Четверовой, Наталье Константиновне Шумской и Людмиле Владимировне Королевой за помощь в обработке проб воды.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены научная новизна и практическая значимость работы, названы основные защищаемые положения.

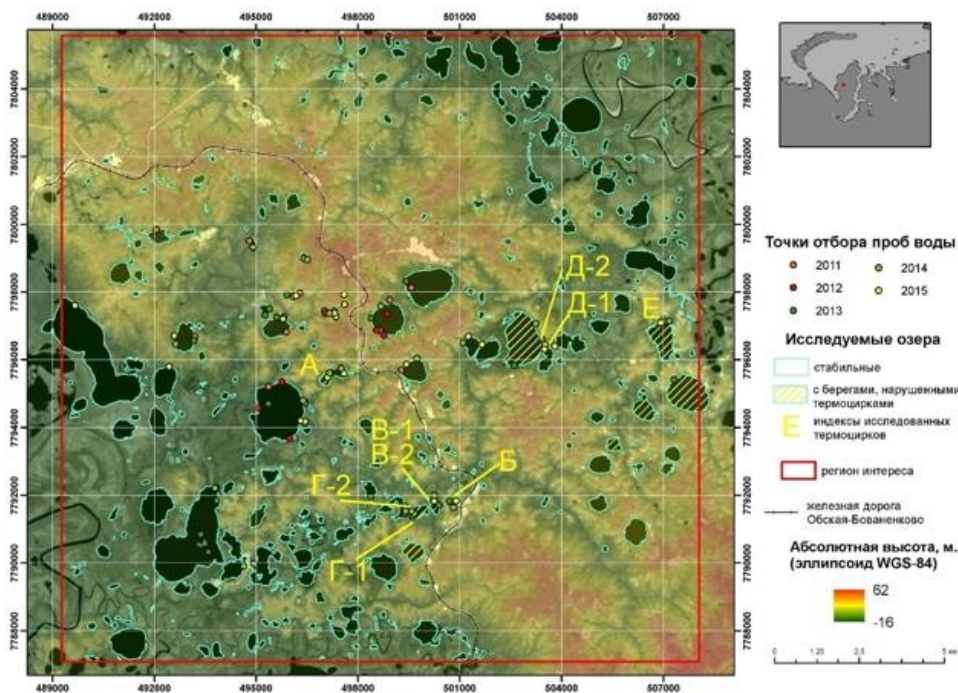
**В главе 1 «Характеристика района работ и постановка задачи мониторинга термоденудации»** приводится общее физико-

географическое описание территории исследования, а также приводится описание термоциков. Последнее десятилетие наблюдается активизация целого круга опасных криогенных процессов, в том числе, по берегам арктических озер и морей (термокарст, термоденудация, термоэрозия). В условиях неглубокого залегания подземных пластовых льдов и расчлененного рельефа, условий, характерных для Центрального Ямала, отмечается активизация термоденудации (Лейбман, Кизяков, 2007; Leibman et al., 2014; Khomutov, Leibman, 2014).

Низменности, расположенные в зоне развития ММП, являются в значительной степени заозеренными (Качурин, 1961; Lehner, Döll, 2004). Озера имеют, главным образом, термокарстовый генезис (Романовский, 1993), связанный с вытаиванием высокольдистых пород, которые широко представлены на территории исследования в виде пластовых льдов (Leibman, 1996; Хомутов и др., 2012), иногда залегающих довольно близко к поверхности (Пармузин, Суходольский 1982; Дубиков, 2002; Лейбман, Кизяков, 2007; Криосфера..., 2013). В условиях ограниченного развития речных долин озера являются базисом эрозии и накопителем информации о твердом и жидком стоке.

Ключевой участок расположен в центральной части полуострова Ямал (Западная Сибирь), (рис. 1) и характеризуется широким распространением пластовых льдов на глубинах с абсолютной высотой от -8 до 30 метров н.у.м., мощность залежей варьирует в пределах от 6 до 30 метров (Leibman, 1995; Стрелецкая, Лейбман, 2002; Хомутов и др., 2012; Leibman et al., 2015).

Криолитологический разрез по скважинам и обнажениям, расположенным на разных участках исследуемой территории, свидетельствует об относительно неглубоком залегании пластовых льдов. Льды, как правило, перекрыты песками и суглинками и подстилаются песками (Дубиков, 2002; Стрелецкая, Лейбман, 2002).



*Рис. 1. Карта фактического материала ключевого участка*

Заозеренность ключевого участка составляет 12%, как и в среднем по Ямалу (10%, Полуостров Ямал, 1975) и может достигать 20% на поймах рек Се-Яхи и Морды-Яхи (Романенко, 1999). Площадь озер составляет от 0,14 до 346,6 га, среднее значение составляет 11,1 га. Измеренная для 19 озер глубина изменяется от 0,1 до 23,2 м, в среднем для всех измеренных озер составляя 3 м ( $n = 25000$ ). Однако, для некоторых озер средняя глубина может составлять 9 и более метров.

Размеры водосборных бассейнов изменяются в диапазоне от 0,25 до 713,93 га при среднем значении 46,65 га, периметр от 0,31 до 32,77 км при среднем значении 3,89 км, отношение площади озера к площади водосборного бассейна варьирует в пределах от 0,01 до 1,69. Верхняя часть водосборных бассейнов сложена песками и глинами, встречаются торфяники, главным образом, в зоне осушки озер, покрыты осоковой растительностью, кустарниками и кустарничками, мхами (Ребристая, Хитун, 1998).

За период исследований ключевого участка, начавшегося в 1987 г., основными криогенными образованиями были криогенные оползни

скольжения (Лейбман, Кизяков, 2007). Термоцирки по берегам озер были крайне редки и незначительны по длине и площади поражения. Наблюдалось лишь 4 термоцирка, два из которых исчезли из-за полной выработки пластового льда, а два оставшихся периодически затухали (Лейбман, 2005).

В 2012 г. специфические климатические условия теплого сезона привели к сходу криогенных оползней течения с образованием новых или вскрытием и дальнейшим ростом древних термоцирков с комплексной деструкцией (Воскресенский, 2001) по повторно-жильным (ПЖЛ) и пластовым льдам (рис. 2). Обнажения, обнаруженные в полевой сезон 2012-2015 гг., выявили погребенные ПЖЛ, вклинивающиеся в пластовые льды (рис. 2). Погребенные залежи торфа (рис. 2) мощностью в несколько метров также вскрываются в обнажениях, формируя при этом блоки между жилами льда. В 2015 году из торфа, обнаруженного в обнажении термоцирка была отобрана водная вытяжка для анализа концентрации растворенного органического углерода. Результаты показали концентрацию, равную 243 мг/л, что является очень высоким значением (средняя концентрация в озерной воде участка составляет 3-5 мг/л).



*Рис. 2. Обнажение термоцирка А*

Происходящие в настоящее время климатические изменения приводят к изменению арктических ландшафтов и, как следствие, к увеличению транспорта органического вещества в озера. Заращение водосборных бассейнов может также привести к образованию дополнительного источника органического вещества в озерах (Pienitz,

Smol, 1993; Wetzel, 2001). Более того, потепление приводит к увеличению температуры пород (Romanovsky et al., 2010) и увеличению толщины СТС (Zhang et al., 1997) и, следовательно, активизации различных криогенных процессов, таких как криогенные оползни и термоцирки (Maskau, 1963; Лейбман, Кизяков, 2007). На содержание органического вещества оказывают влияние также характеристики самих водоемов. Содержание РОВ в озерах может быть определено не только в полевых условиях, но также и с использованием оптических ДДЗ (Kutser et al., 2005a), которые, в случае удовлетворительной калибровки, могут быть использованы для оценки содержания органического вещества в озерной воде на значительной территории.

В работе автор предлагает подход к анализу распространения термоцирков по состоянию озер, в береговой зоне которых, они как правило, и образуются. Подход заключается в исследовании комплексом полевых, лабораторных и дистанционных методов содержания РОВ, как индикатора изменений, происходящих в системе «водосборный бассейн – озеро».

**В главе 2 «Комплекс полевых, лабораторных и дистанционных методов изучения окрашенного растворенного органического вещества в озерах Ямала»** приводится описание параметра окрашенного растворенного органического вещества (**ОРОВ**), его общие характеристики, методы исследования, а также результаты опробования.

Органическое вещество – составляющая любых внутренних водоемов. Органическое вещество может быть представлено в растворенном и взвешенном состоянии. Окрашенная фракция растворенного органического вещества (ОРОВ), в англоязычной литературе CDOM (coloured dissolved organic matter), является значимым компонентом водных экосистем (Kalle, 1939; Скопинцев, 1950), включая озера высокоширотной Арктики (Vincent et al., 1998). Различия между

растворенной и взвешенной фракциями определяется размером молекул. Принято, что растворенная фракция - та, которая меньше 0,45–1  $\mu\text{m}$  (Романкевич, 1997), и, следовательно, может быть отделена при помощи фильтрования с использованием фильтров с соответствующим размером пор.

Поглощая, главным образом, коротковолновое излучение (ультрафиолетовое и голубой участок видимого диапазона), ОРОВ оказывает влияние на степень проникновения солнечного света в глубинные слои водных объектов, а также на их температурный режим (Zaneveld, 1975; Vincent, Pienitz, 1996; Twardowski, Donaghay, 2001).

РОВ в водоемах имеет два источника: автохтонный и аллохтонный (Kalle, 1966). Автохтонное РОВ образуется непосредственно в пределах водоемов, являясь продуктом жизнедеятельности фитопланктона, в то время как аллохтонное РОВ - поступившее в водный объект из окружающего его водосборного бассейна. В северных высокоширотных озерах автохтонное РОВ не играет определяющей роли в формировании общей концентрации РОУ вследствие неблагоприятных климатических условий и «не-обильности» фитопланктона, в то время как аллохтонное РОВ может составлять основную часть концентрации РОУ (Wetzel, 2001, Engstrom, 1987).

В работе анализировались 2 измеряемых параметра ОРОВ:

1) Значение абсорбции (оптической плотности) электромагнитного излучения на определенном участке спектра (длине волны,  $\lambda$ ),  $a_{\text{ОРОВ}}(\lambda)$ . Кривая поглощения солнечного света молекулами ОРОВ имеет вид экспоненты, убывающей с увеличением  $\lambda$  (Jerlov, 1968). Значения абсорбции на участке от 700 нм, как правило, равняются нулю (напр. Davis-Colley, Vant, 1987; Twardowski et al., 2004). Абсорбция ОРОВ на определенной  $\lambda$  прямо пропорциональна концентрации ОРОВ в воде.

2) Значение спектрального угла наклона  $S$ , вычисляемое для определенного участка длин волн ( $\lambda_1-\lambda_2$ ), может служить характеристикой источника ОРОВ в воде (Twardowski et al., 2004; Helms et al., 2008; Carder et al., 1989). Более низкие значения  $S$  служат индикатором того, что в воде растворено больше органики алохтонного происхождения (Laurion et al., 1997), что связано с более высокой долей гуминовых кислот, имеющих больший молекулярный вес (Kaishan et al., 2015), которые более интенсивно поглощают длинноволновое электромагнитное излучение. Значение  $A_{ОРОВ}(\lambda)$  при этом повышается, а значение  $S$ , соответственно, падает.

Пробы воды на ключевом участке для определения концентрации ОРОВ были собраны в спокойных погодных условиях из верхних 30 см водного столба, с берега или в центре озера с лодки в августе-сентябре 2011-2015 гг.

Всего за 5 лет было отобрано 75 проб из 30 озер, результаты обработки которых были использованы в основном анализе. Приводится информация о методике отбора проб воды и их хранении и обработки в лабораторных условиях. Также приводятся результаты измерений концентрации ОРОВ за 5 лет.

Далее приводится методика получения информации об оптической плотности  $a_{ОРОВ}(440)$  с использованием оптических данных дистанционного зондирования. Приводится подробная методика коррекции ДДЗ перед извлечением информации (проведение геометрической, радиометрической, атмосферной коррекции).

На основании алгоритма, подразумевающего соотношение каналов зеленого и красного, разработанного (Kutser et al., 2005a, 2005b), были рассчитаны значения  $a_{ОРОВ}(440)$  для 121 озера с использованием снимка GeoEye-1 за 15-08-2009 и для 363 озер с использованием снимка GeoEye-1 за 05-07-2013. 117 из 121 озера входят в список 363 озер за вторую дату.



Более того, приводятся данные измерения концентрации ОРОВ в разных частях озер (у разных берегов, в центре озер), а также различия в измеренных концентрациях в пробах, отобранных в верхнем слое воды и на глубине. Выявлено, что различия в аОРОВ(440) в разных частях озера не превышают 18 процентов, различия по глубине не превышают 13 процентов, что свидетельствует о высокой степени перемешивания воды в озерах Ямала вследствие сильных ветров и отсутствия геоморфологических барьеров и барьеров в виде древесной растительности.

**Глава 3 «Параметры, влияющие на концентрацию ОРОВ в озерах Ямала»** в целом описывает методику получения параметров природной среды, которые, помимо процессов термоденудации, могли бы оказать влияние на различие в концентрации ОРОВ в различных озерах. Среди этих параметров: морфометрические особенности озер и их водосборных бассейнов, характер рельефа, особенности растительного покрова и снегонакопления на территории исследования.

Приводятся результаты расчетов объема воды в 18 озерах, а также приводится зависимость концентрации ОРОВ в озерной воде от рассчитанного объема воды. Коэффициент детерминации 0,3 говорит о наличии некоторой зависимости, однако неявной, что свидетельствует о преобладании других факторов, влияющих на концентрацию ОРОВ в озерах.

Также приводится методика обработки ЦМР TanDEM-X с пространственным разрешением 12 метров и получения конечного продукта – выделенных в автоматическом режиме контуров водосборных бассейнов для 363 озер.

Для улучшения качества растровая модель была конвертирована в векторную точечную модель и заново интерполирована с учетом векторных полигонов озер, векторных линий рек и ручьев, структурных

линий рельефа с применением алгоритма TopoToRaster, доступного в программе ArcGIS 10.2.2. (ESRI Inc©). После интерполяции к новой растровой модели была применена процедура “заполнение понижений” для исключения “провалов” – аномально низких значений. ЦМР затем была использована для расчета поверхности «направление стока» в модуле ArcHydro (Djokic et al., 2011) и далее в автоматическом режиме, с использованием поверхности «направление стока», были выделены векторные полигоны водосборных бассейнов. Все водосборные бассейны затем были вручную проверены и исправлены на участках притока и оттока воды, которые неправильно отображаются в автоматическом режиме.

Описывается разработанная методика картографирования мощности снежного покрова на территории исследования, а также методика расчета запаса воды в бассейнах в виде водного эквивалента снежного покрова.

Орографические условия тундр Центрального Ямала обуславливают крайне неравномерное распределение снежного покрова. Моделированием удалось количественно подтвердить закономерность распределения снежного покрова: сдувание ветром с вершин холмов и накопление в понижениях, отмеченную другими авторами. Для количественной оценки этой закономерности в общей модели предложено введение специальной поправки, использующей значения экспозиции склонов. Использование поправки позволяет индексировать склоны по отношению к господствующему направлению ветра и автоматизировать ее введение.

На основе статистического анализа данных выявлена существенная ( $R = -0,83$ ) взаимосвязь индекса кривизны поверхности и толщины снежного покрова. Однако, представляется очевидным, что такая тесная связь параметров может быть получена только с использованием ЦМР высокого разрешения. В противном случае корреляция этих параметров может быть существенно снижена.

Связь высоты кустарников и толщины снега прослеживается в том случае, когда отрицательная форма рельефа не предопределяет накопления снега большей, чем высота кустарника, толщины, как например, в оврагах. Однако, кустарники задерживают часть снежного покрова, оказывая лимитирующее воздействие.

На основе полевых данных и выявленных закономерностей между различными факторами и толщиной снежного покрова разработана методика моделирования водного эквивалента снежного покрова на основе ГИС (Дворников и др., 2015).

В дополнение, в главе описывается процесс создания базы геоданных (БГД) для оптимизации накопления и обработки полученных данных и их пространственного анализа, а также приводится описание процедуры создания сетевой ГИС.

БГД включает в себя 11 векторных наборов пространственных данных, имеющих единую координатную систему WGS-84 и трансформированы в проекцию Меркатора (зона 42N): 1) батиметрия, 2) социально-экономические объекты, 3) полевые данные, 4) геоморфология, 5) гидрография, 6) ландшафты, 7) ММП, 8) снежный покров, 9) рельеф, 10) растительность, 11) локальные объекты (площадка CALM, трансекта и т.д.). В сумме, все 11 наборов пространственных данных содержат 60 классов пространственных объектов и более чем 80000 объектов геометрии. Также БГД содержит растровые данные и метаданные.

БГД является основой для WebGIS “Ямал”, служащей для визуализации геоданных и их распространения среди потенциальных пользователей. Данные, структурированные и накопленные в базе легли в основу статистических и теоретических моделей, представленных в работе.

**В главе 4 «Теоретическая (описательная) модель активности термоденудации на основе статистической модели источников ОРОВ в**

**озерной воде»** обобщены результаты, описанные в предыдущих главах, и приведены возможности использования параметра ОРОВ в качестве индикатора активности процессов термоденудации.

Приводятся результаты статистической обработки полученных параметров, описанных в главе 3, для выявления наиболее значимых из них, влияющих на различия в концентрации ОРОВ в озерах Ямала.

При обработке было принято, что аОРОВ(440) является зависимой величиной, а другие параметры природной среды (характеристики самих озер и их водосборных бассейнов) являются независимыми величинами и в разной степени влияют на зависимую величину. Статистическая обработка была применена к набору данных аОРОВ(440), полученных на основе обработки ДДЗ 2013 г. (n=363). Была применена процедура улучшенного регрессионного анализа “boosted regression tree” (Elith et al., 2008). Результаты статистической обработки параметров водосборных бассейнов и озер выявили доли различных параметров, влияющих на концентрацию ОРОВ. Этими параметрами являются: 1) соотношение площадей озера и водосборного бассейна (доля 26,8%), 2) высота уреза воды озера (доля 26%), 3) снегозапасы в водосборном бассейне (доля 26%), 4) активность термоденудации (доля 12,8%), 5) продуктивность растительного покрова (доля 6,6%).

Также, в главе приведены данные о динамике образовавшихся термоцирков в период с 2012 по 2015 гг., а также данные о различии в концентрации ОРОВ в озерах, береговая линия которых нарушена процессами термоденудации и озерах, береговая линия которых не нарушена этими процессами.

В 2015 году в полевых и камеральных условиях проведен количественный анализ развития термоденудационных форм (термоцирков), образовавшихся, главным образом, в летний период 2012 года (Leibman et al., 2015).

Мониторинг термоцирков в 2012-2015 гг. позволил выявить годовой прирост этих термоденудационных форм. Инструментальными измерениями за отступанием бровки термоцирков установлено, что скорость прироста их площади на начальном этапе активизации термоденудации в подавляющем большинстве случаев максимальна.

Прирост площади термоцирка в последующий год после активизации процесса превышает 100% от общей площади при возникновении новых форм и 50% при ре-активизации временно стабилизировавшихся «классических» термоцирков, развивающихся по пластовым льдам. Прирост для термоцирков с сочетанием вытаивания пластового и ПЖЛ также близок к 50% от общей площади. Максимальное отступление может достигать 25-30 м/год при средних значениях 15 м/год. Сопоставление положения бровок термоцирков в 2013 г. по космоснимку в первой половине теплого периода и полевых данных в конце теплых периодов 2012-2015 гг. показало, что темпы прироста площади термоцирков сокращаются с постепенным увеличением их суммарной площади.

Анализ полевых данных за 2014 и 2015 гг. отдельно для озер без термоцирков и озер с термоцирками показал, что медиана значений аОРОВ(440) у озер с термоцирками может быть в 2-3 раза выше, чем у озер без термоцирков (рис. 3). Это означает, что процесс термоденудации в береговой линии озера на ранней стадии может значительно повысить концентрацию ОРОВ. Статистический анализ также показал, что озера с термоцирками обладают более низкими значениями  $S$  (0,014) по сравнению с озерами без термоцирков (0,017) (рис. 3), что говорит об увеличении доли аллохтонного ОРОВ в озерах с термоцирками (Laurion et al., 1997).

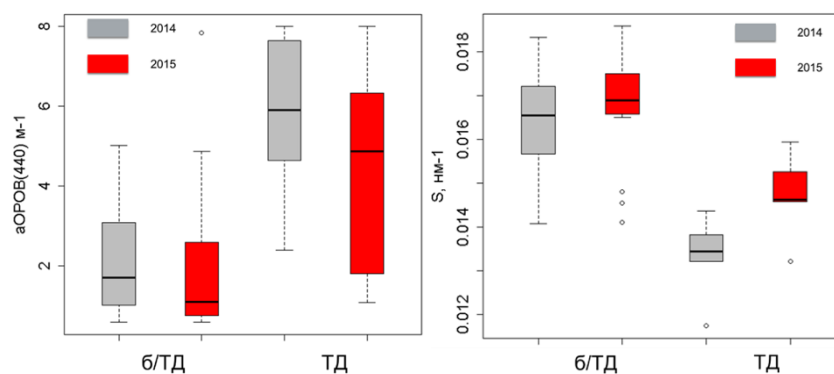


Рис. 3. Различия в оптической плотности  $a_{OP(440)}$  (слева) и параметра  $S$  (справа) в озерах без активной термоденудации в береговой зоне (б/ТД) и с активными термоциркулями (ТД). Приведены данные по результатам полевых работ 2014 и 2015 гг.

Удалось также детально оценить изменение концентрации ОРОВ в озерах в 2013 г. (с активными термоциркулями) по сравнению с 2009 годом, когда активных термоциркулей не существовало. В табл. 1 приведены результаты определения оптической плотности ОРОВ на 440 нм за 2009 и 2013 годы.

Таблица 1.

Увеличение концентрации ОРОВ в определенных озерах, вызванное активностью термоциркулей в береговой зоне

Озеро	$a_{OP(440)}$ , $m^{-1}$ (2009)	$a_{OP(440)}$ , $m^{-1}$ (2013)	Прирост в %
LK-015	1,277	5,265	312
LK-027	0,528	2,664	404
LK-178	2,329	9,371	302
LK-298	1,078	7,444	590

Таким образом, используя знания об активности процессов термоденудации на Ямале, а также полученные знания о динамике параметра концентрации ОРОВ в озерах и зависимость от различных факторов, таких как свойства водосборных бассейнов и озер, а также климатических изменений, возможно проводить мониторинг образования термоциркулей и оползней на более обширной территории, используя ДДЗ.

При переходе от более крупного к более мелкому масштабу, возможно выделение зон и районов, где риск образования подобных опасных процессов наиболее вероятен, вследствие наличия залежеобразующих льдов, находящихся близко к поверхности. Алгоритмы автоматизированного выделения озер и их водосборных бассейнов, разработанные или усовершенствованные в этой работе, позволяют достаточно быстро оценивать экологическое состояние систем “водосборный бассейн – озеро”.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1) В работе установлены связи концентрации растворенного органического вещества в озерной воде с активностью процессов термоденудации. Выявлено, что в озерах, береговая зона которых нарушена активными термоцирками, концентрация окрашенного растворенного органического вещества может быть в 2-3 и даже более раз выше, чем в озерах с ненарушенными берегами. Залежи торфа, обнаруженные в обнажениях на Центральном Ямале, служат значительным источником аллохтонного органического вещества, которое попадает в озерную воду после образования термоцирков и криогенных оползней. Измерение концентрации растворенного органического углерода в водной вытяжке из торфяной залежи одного из термоцирков показало очень высокие значения (243 мг/л) при средней концентрации этого параметра в озерной воде 3-5 мг/л. Количественно показано, что в период после 2012 года, когда произошло массовое образование термоцирков, в озерах наблюдались более низкие значения спектрального уклона кривой абсорбции окрашенного растворенного органического вещества, что является показателем дополнительного притока аллохтонного органического вещества, ранее находившегося в захороненном мерзлом состоянии.

2) Установлено, что изменение концентрации окрашенного растворенного органического вещества в озерах с термоцирками, наряду с увеличением концентрации взвешенного вещества, являются хорошими индикаторами динамики ландшафтов.

3) Инструментальными измерениями за отступанием бровки термоцирков установлено, что скорость прироста их площади на начальном этапе активизации термоденудации в подавляющем большинстве случаев максимальна. Прирост площади термоцирка в первый год активизации процесса превышает 100% от общей площади при возникновении новых форм и 50% при ре-активизации временно стабилизировавшихся «классических» термоцирков, развивающихся по пластовым льдам. Прирост для термоцирков с сочетанием вытаивания пластового и повторно-жильного льда также близок к 50% от общей площади. Максимальное отступление может достигать 25-30 м/год при средних значениях 15 м/год.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **В журналах, рекомендованных ВАК:**

1. **Дворников Ю.А.**, Хомутов А.В., Муллануров Д.Р., Ермохина К.А. Моделирование распределения водного эквивалента снежного покрова в тундре с использованием ГИС и данных полевой снегомерной съёмки // Лёд и Снег. – 2015. – Т.55. - №2. – С. 69-80. DOI:10.15356/2076-6734-2015-2-69-80.

2. Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Лейбман М.О., Дагуров П.Н., Кирбижекова И.И., **Дворников Ю.А.**, Бердников Н.М. Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных // Вестник СибГАУ. - 2013. - Вып. 5(51). - С. 65-68.

#### **В других рецензируемых журналах:**

3. **Dvornikov Y.A.**, Khomutov A.V., Mullanurov D.R., Ermokhina K.A., Gubarkov A.A., Leibman M.O. GIS and field data-based modelling of snow water equivalent in shrub tundra // Fennia. – 2015. - №193(1). – P. 53–65.



4. Leibman M.O., Khomutov A.V., Gubarkov A.A., Mullanurov D.R., **Dvornikov Yu.A.** The research station "Vaskiny Dachi", Central Yamal, West Siberia, Russia – A review of 25 years of permafrost studies // *Fennia*. – 2015. - №193(1). - P. 3–30.

**Тезисы и материалы конференций:**

5. **Дворников Ю.**, Скороспехова Т., Лейбман М., Хайм Б., Бартч А, Федорова И, Хомутов А, Видхельм Б, Михайлова М, Шадрина А, Муллануров Д. Транспорт органического вещества в системах "водосборный бассейн - термокарстовое озеро" полуострова Ямал // Матер. IV Всеросс. науч. молодеж. форума геокриологов, посвящ. 200-летию со дня рожд. ак. А.Ф. Миддендорфа, (29 июня - 1 июля 2015 г., г. Якутск). ИМЗ им. П.И. Мельникова СО РАН. - 2015.

6. **Дворников Ю.А.**, Лейбман М.О. Оценка поступления органического вещества в термокарстовые озера Ямала с использованием дистанционных и наземных наблюдений // Геокриологическое картографирование: Проблемы и перспективы: Программа конференции. Тезисы конференции. Москва, 5-6 июня 2013 г. - М.: РУДН. - С. 38-40.

7. **Дворников Ю.А.**, Лейбман М.О., Хомутов А.В., Хайм Б., Рёсслер С. Термокарстовые озера Ямала, как индикатор климатических изменений // Межд. конф. "Криология Земли: XXI век" (29 сентября-3 октября 2013, Пущино, Моск. обл.). Пущино, 2013, С. 132-133.

8. **Dvornikov Y.**, Leibman M., Heim B., Bartsch A., Hubberten H.-W. Combining optical and radar remote sensing data for the study of organic transport in "thermokarst lake - catchment" systems of Russian Arctic // *Proceedings of Arctic Science Summit Week 2015*, 26-30 April 2015, Toyama, Japan.

9. **Dvornikov Yu.**, Bartsch A., Khomutov A., Heim B., Widhalm B., Fedorova I., Leibman M., Skorospekhova T. Process of organic transport in lakes of the Yamal region (POLYAR) // *Arctic Change 2014*. 8-12 December. Ottawa, Canada. Oral Presentation Abstracts. – 2014. - P.56.