

Санкт-Петербургский государственный университет

МИРОНОВ Максим Сергеевич

Выпускная квалификационная работа

Изучение термокарстовых озёр полуострова Ямал с применением методов геоинформатики и данных дистанционного зондирования Земли

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.03 «Геоинформационное картографирование»

Основная образовательная программа ВМ.5523.2020 «Геоинформационное картографирование»

Профиль «Картография»

Научный руководитель:
доцент кафедры картографии и геоинформатики СПбГУ,
к.г.н. Сидорина Инесса Евгеньевна



Рецензент:
научный сотрудник МГУ им. М.В. Ломоносова,
к. г.-м. н. Дворников Юрий Александрович

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Теоретические основы изучения термокарстовых озёр методами геоинформатики и данных дистанционного зондирования Земли	5
1.1. Термокарстовые озёра как объект исследования	5
1.2. Отечественные и зарубежные исследования термокарстовых озёр п-ва Ямал	7
1.3. Факторы природной среды, влияющие на динамику термокарстовых озёр Ямала...11	
1.4. Использование ДДЗЗ и ГИС для исследования термокарстовых озёр п-ва Ямал12	
Глава 2. Методика исследования термокарстовых озёр п-ва Ямал с помощью ДДЗЗ	18
2.1. Определение района исследования для выявления подверженных дегазации озёр ..18	
2.2. Поиск коллекции космических снимков	20
2.3. Выявление термокарстовых озёр по признакам дегазации метана	21
Глава 3. Проведение комплексного исследования на примере территории нижнего течения реки Еркута и термокарстового озера.....	27
3.1. Полевые исследования и производство площадной аэрофотосъёмки озера..	31
3.2. Применение методов геоинформатики для анализа данных и создания карт на территорию нижнего течения реки Еркута	39
3.3. Анализ полученных данных и формирование выводов.....	41
Заключение.....	42
Список литературы.....	43
Приложения	46

Введение

В последние годы, изучение термокарстовых озёр Ямала привлекает внимание ученых со всего мира. Термокарстовые озёра являются специфическими водными объектами, образующимися в результате таяния многолетней мерзлоты. Эти озера не только представляют уникальный экосистемный интерес, но и являются важными индикаторами глобальных климатических изменений.

Несмотря на то, что на территории Ямала уже проведено множество исследований, многие вопросы по-прежнему остаются открытыми. В настоящее время, современные методы исследований, такие как спутниковая съемка и геоинформационные технологии, позволяют получить более точные и полные данные о термокарстовых озёрах и их изменениях.

Целью данной научной работы является анализ термокарстовых озёр Ямала на основе современных методов исследования. Работа будет включать в себя сбор и анализ данных о геоморфологии, гидрологии, геохимии и биологических особенностях термокарстовых озёр. Полученные результаты помогут лучше понять процессы, происходящие в этих озёрах, и их влияние на экосистему Ямала.

Объект исследования: термокарстовые озёра полуострова Ямал

Предмет исследования: алгоритмы мониторинга эмиссии метана методами геоинформатики и дистанционного зондирования Земли

Актуальность исследования: Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки накопления метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты. Эти озера могут являться наиболее активными источниками эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий, что может влиять на климатическую и экологическую ситуацию. Применение методов геоинформационного картографирования и дистанционного зондирования Земли для изучения термокарстовых озер п-ва Ямал дает возможность получения комплексной и полной информации для исследования

Задачи:

1. Провести обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования, включающий анализ основных научных работ в данной области.
2. Определить методы исследования, которые будут использованы в работе. В частности, рассмотреть применение спутниковой съемки и геоинформационных технологий.
3. Провести сбор данных о геоморфологии, гидрологии, геохимии и биологических особенностях термокарстовых озер Ямала.

4. Проанализировать полученные данные и выявить закономерности и особенности, свойственные термокарстовым озерам Ямала.

5. Составить карту ключевого участка на основе синтеза геологических, тектонических, нефте-газоносных и полевых данных

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР МЕТОДАМИ ГЕОИНФОРМАТИКИ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

1.1 Термокарстовые озёра как объект исследования

В России термокарст является распространенным геологическим явлением, которое связано с особенностями природной среды и климата. В различных регионах страны можно наблюдать разнообразие природных условий, которые влияют на формирование и развитие термокарстовых образований. Россия, с ее обширными территориями и разнообразными природными регионами, предлагает уникальные возможности для изучения термокарста. От арктических регионов до южных тундровых и тайговых зон, от Сибири до Дальнего Востока - каждый регион имеет свои особенности и характерные черты термокарстовых образований.

В Арктике и субарктической зоне, например, на Ямале, Кольском полуострове и в Западной Сибири, термокарстовые озёра и впадины широко распространены из-за наличия обширных мерзлотных почв и вечной мерзлоты. Здесь процессы таяния мерзлоты и формирования озёр связаны с повышением температуры и изменениями в гидрологическом режиме.

В северных регионах Сибири и Дальнего Востока, где климат холодный и суровый, термокарст проявляется в виде воронок, осыпей и иных форм, вызванных таянием мерзлоты и обрушениями почвы.

На Южном Урале и в некоторых регионах Западной Сибири, где климат более умеренный, термокарстовые формы могут быть связаны с различными геологическими процессами, такими как растворение гипсовых пластов или освобождение газа в результате деятельности нефтегазовых месторождений.

Таким образом, Россия предлагает богатый спектр природных условий, в которых происходят термокарстовые процессы. Изучение этих процессов и их воздействия на окружающую среду позволяет лучше понять геологические и экологические особенности различных регионов и разработать эффективные подходы к управлению и сохранению

этих уникальных природных образований.

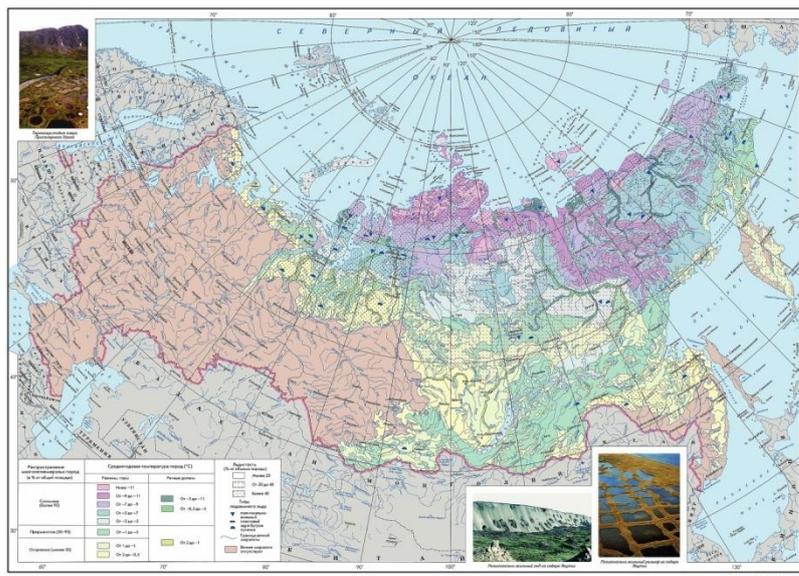


Рисунок 1. Карта вечной мерзлоты 1: 15 000 000
(Национальный атлас России, 2007)

Термокарст - это геологический процесс, при котором таяние мерзлоты приводит к образованию впадин, воронок или впадений в ландшафте. Этот процесс обычно происходит в регионах с мерзлотными почвами или вечной мерзлотой, где подземные слои льда тают из-за повышения температуры или изменений гидрологического режима.

Термокарст вызывает резкие изменения рельефа, поскольку таяние мерзлоты приводит к обрушению и оседанию почвы, формированию трещин и впадин. Это может приводить к образованию озер, воронок, руин и других геоморфологических форм.

Открытие и изучение термокарста связано с именем русского ученого и геолога Владимира Ивановича Вернадского (1863-1945). Вернадский впервые систематически изучил и описал процессы термокарста в конце XIX и начале XX века в Сибири и других регионах России. Он проводил экспедиции и собирал данные о формировании озер, трещин и впадин, а также исследовал связь термокарста с климатическими условиями и изменениями в гидрологическом режиме. Термокарстовые озёра представляют собой важный объект исследований в контексте изучения изменений климата и воздействия на окружающую среду. В последние десятилетия большое количество исследований подтверждает, что термокарстовые озёра являются значительным источником эмиссии метана, главного парникового газа.

Метан (CH_4) является мощным парниковым газом, который способен удерживать тепло в атмосфере в разы эффективнее углекислого газа. Исследования показывают, что термокарстовые озёра играют существенную роль в глобальном цикле метана, внося значительный вклад в его эмиссию.

Большое количество научных исследований, проведенных в различных регионах мира, включая Россию, Северную Америку и Арктику, подтверждает высокие уровни эмиссии метана из термокарстовых озёр. Исследования проводились с использованием различных методов, включая наземные измерения, дистанционное зондирование, мониторинг и моделирование. Эти исследования позволили оценить масштабы эмиссии метана и выявить факторы, влияющие на этот процесс.

Понимание и оценка эмиссии метана из термокарстовых озёр являются важными задачами для науки и экологического планирования. Эти исследования помогают предсказывать будущие изменения климата, разрабатывать стратегии адаптации и снижения воздействия на окружающую среду. Также они вносят важный вклад в глобальные усилия по борьбе с изменением климата и охране природных ресурсов.

Исследования по изучению эмиссии метана из термокарстовых озёр часто используют данные дистанционного зондирования для получения информации о распределении и динамике этих образований. Дистанционное зондирование предоставляет возможность получать данные о поверхностных характеристиках и процессах на больших территориях без необходимости проводить экспедиционные исследования в труднопроходимых местах.

Одним из основных инструментов дистанционного зондирования, используемых для изучения термокарстовых озёр, является спутниковая съемка. Спутники оборудованы специальными сенсорами, которые регистрируют электромагнитное излучение, отраженное от земной поверхности. С помощью различных диапазонов электромагнитного излучения, таких как видимый свет, инфракрасное и микроволновое излучение, можно получить информацию о состоянии и характеристиках территории.

Данные дистанционного зондирования позволяют установить распределение термокарстовых озёр, их размеры, форму и динамику изменений со временем. Используя методы обработки и анализа этих данных, исследователи могут получить информацию о площади затопленных областей, глубине озёр, скорости их роста или исчезновения, а также о других характеристиках, связанных с динамикой термокарстовых процессов.

Для изучения эмиссии метана из термокарстовых озёр данные дистанционного зондирования комбинируются с другими источниками информации, например, с метеорологическими данными и местными измерениями. Это позволяет оценить объемы эмиссии метана и выявить связь с окружающими факторами, такими как температура, влажность почвы и геологические особенности.

1.2 Отечественные и зарубежные исследования эмиссии метана из термокарстовых озёр

Существует множество зарубежных исследований, посвященных эмиссии метана из термокарстовых озёр.

Например, в рамках проекта "MethaneNet" и опубликованное в журнале "Environmental Research Letters" статья "Methane emissions proportional to permafrost carbon thawed in Arctic lakes since the 1950s", опубликованная в 2019 году в журнале Environmental Research Letters, посвящена изучению эмиссии метана из термокарстовых озёр в Арктике. Исследователи обнаружили, что эмиссии метана из этих озёр значительно увеличились с 1950-х годов.

Для исследования авторы использовали данные о площади озёр и количестве углерода, высвобождающегося из термокарстов при их таянии. Они обнаружили, что эмиссии метана из термокарстовых озёр в Арктике выросли в 3,3 раза и составляют сейчас около 17% общей эмиссии метана из этого региона.

Это свидетельствует о том, что увеличение эмиссии метана из термокарстовых озёр может стать серьезной угрозой для климата. Метан, как известно, является гораздо более эффективным газом-теплицей, чем углекислый газ. Поэтому, более высокие эмиссии метана могут привести к ускорению глобального потепления и увеличению его последствий.

Эта статья подчеркивает необходимость тщательного изучения и мониторинга эмиссий метана из термокарстовых озёр, чтобы понимать, как изменения климата влияют на это явление и какие меры можно принять для его смягчения. В исследовании также указывается, что озёра, сформированные в результате таяния термокарстов, могут продолжать выделять метан в атмосферу на протяжении многих лет, поэтому эта проблема требует дополнительных исследований и мониторинга.

Исследователи обнаружили, что общая эмиссия метана из этих озёр составляет около 1,6 миллиона тонн в год, что значительно больше, чем предполагалось ранее.

Другая статья - "Satellite-observed CH₄ emissions from Arctic thermokarst lakes show importance of vegetation cover" была опубликована в журнале "Nature Communications" в 2018 году. В рамках исследования было проанализировано спутниковое наблюдение за эмиссией метана из термокарстовых озёр на Аляске за период с 2000 по 2014 годы.

Результаты исследования показали, что эмиссия метана из термокарстовых озёр значительно варьирует в зависимости от покрова растительности. Большинство озёр, находящихся в зонах с тундровой и лесотундровой растительностью, имели значительно

более низкие уровни эмиссии метана по сравнению с озерами, расположенными в зонах без растительности или с низкой плотностью растительности.

Исследование позволило выявить значимую роль растительного покрова в контроле эмиссии метана из термокарстовых озер и связать этот процесс с изменением климата. Растительный покров оказывает влияние на скорость таяния и глубину оттаивания перманентного мерзлотного слоя, который играет ключевую роль в образовании термокарстовых озер.

Эти результаты могут быть использованы для разработки более точных моделей эмиссии метана из термокарстовых озер в Арктике и улучшения наших прогнозов изменения климата в будущем.

.Также были проведены исследования в других регионах мира, например, в Сибири и на Ямале в России. Исследователи измеряли эмиссию метана с помощью наземных и аэрофотосъемок и обнаружили, что термокарстовые озера на этих территориях также являются значительным источником метана. Статья "Methane emissions from lakes on the northern margin of the East Siberian Ice Complex", опубликованная в журнале "Biogeosciences" в 2016 году, рассматривает эмиссию метана из термокарстовых озер на северном крае Восточно-Сибирского Ледяного Комплекса. Исследование основано на наземных и аэрофотосъемках, а также на анализе химического состава газовых проб, взятых в различных точках озер.

Исследователи обнаружили, что эмиссия метана из термокарстовых озер на северном крае Восточно-Сибирского Ледяного Комплекса значительно превышает оценки, проведенные ранее. Это связано с тем, что ранее использовавшиеся методы не учитывали некоторые факторы, такие как глубина озер и наличие растительности вокруг них.

Исследование показало, что наиболее высокие эмиссии метана наблюдаются в летний период, когда температура повышается и ускоряется процесс таяния перманентного мерзлотного слоя. Также было выявлено, что наличие растительности вокруг озера оказывает существенное влияние на эмиссию метана: в тех местах, где растительности было больше, эмиссия метана была меньше.

Результаты этого исследования позволяют лучше понимать механизмы эмиссии метана из термокарстовых озер на северном крае Восточно-Сибирского Ледяного Комплекса, а также помогают сделать более точные прогнозы о влиянии этой эмиссии на глобальный климат.

Статья "Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming" была опубликована в журнале Nature в 2006 году и стала одной из первых

попыток оценить влияние эмиссии метана из термокарстовых озер на климатические изменения.

Исследователи из Германии и России провели экспедицию в Сибирь, где нашли и изучили более 500 озер, образовавшихся в результате таяния мерзлоты. Они обнаружили, что многие из этих озер выделяют значительные объемы метана в атмосферу в результате процессов анаэробного распада органического вещества на дне озер.

Кроме того, исследователи отметили, что метан выделяется из озер в виде пузырьков (рис. 2), которые могут легко достигать поверхности воды и попадать в атмосферу. Они также заметили, что эмиссия метана из этих озер быстро увеличивается вместе с ростом температуры окружающей среды.

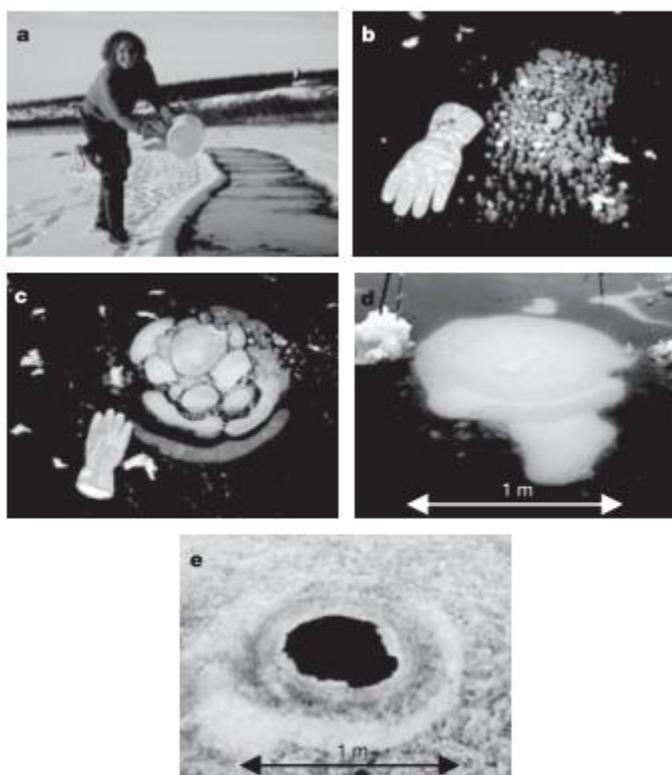


Рисунок 2. Фотографии пузырьков CH_4 , попавших в озерный лед, представляют собой точечные источники образования пузырьков. Распределение точечных источников кипения было измерено вдоль разрезов на льду озера (a), что позволило выделить четыре различные категории скоплений пузырьков с соответствующими показателями CH_4 (NatureSearch, October 2006 Nature 443(7107):71-5, DOI: 10.1038/nature05040)

Исследование подчеркнуло, что эмиссия метана из термокарстовых озер может быть существенным и до сих пор недооцененным источником парниковых газов в атмосфере. Авторы статьи указали на возможность такой эмиссии метана служить положительной обратной связью для климатических изменений, ускоряя процесс глобального потепления.

Это исследование стало одним из первых научных доказательств важности изучения и контроля над эмиссией метана из термокарстовых озёр в связи с изменением климата.

В целом, зарубежные исследования подтверждают, что термокарстовые озера являются значительным источником метана, и что эта проблема требует серьезного внимания с точки зрения изменения климата

1.3 Факторы природной среды, влияющие на динамику термокарстовых озёр Ямала

Ямал - это полуостров, расположенный в Северной части Западной Сибири, в Российской Федерации. Этот регион известен своим уникальным природным наследием и является одним из ключевых районов для изучения термокарстовых озёр.

Географические условия на Ямале способствуют образованию и развитию термокарстовых озёр. Здесь преобладает арктический климат с холодными зимами и прохладными летами. Зимы на Ямале длительные и холодные, с температурами, опускающимися до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. Таяние снега и мерзлоты происходит в течение короткого летнего периода.

На Ямале обширно распространена мерзлота, которая представляет собой замороженные почвы и грунты. Мерзлота является характерным природным компонентом этого региона и играет важную роль в формировании термокарстовых озёр. Под воздействием тепла летнего периода, верхние слои мерзлоты начинают таять, что приводит к образованию впадин и воронок, в которых скапливается вода.

Важным фактором, способствующим образованию термокарстовых озёр на Ямале, является наличие нефтегазовых месторождений. Добыча нефти и газа может вызывать изменения в геологической структуре и гидрологическом режиме, что влияет на термокарстовые процессы. Оттоки воды, освобождение газа и изменения в гидрологическом балансе могут способствовать формированию озёр и впадин.

Южный Ямал - это плоская низменная аккумулятивная равнина, наибольшие высоты которой располагаются на хребте Сопкей в бассейне реки Щучья. На территории уголья протекают реки, которые пересекают все три надпойменных террасы Оби. Гидрографическая сеть (рис.3) хорошо развита, и избыточное увлажнение, равнинный рельеф с большим количеством впадин способствуют развитию многочисленных озёр и болот. Почвы представлены аллювизёмами, которые мало заливаются паводками и находятся под влиянием зональных факторов почвообразования. Климат суровый, континентальный. Весна и осень короткие, а зима длится 6-6,5 месяцев, средняя

температура января $-23-25^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков 350-400 мм, и угодье находится в зоне избыточного увлажнения. Полуостров Ямал, расположенный в Северной части Западной Сибири, имеет свои уникальные гидрологические особенности, связанные с его географическим положением, климатическими условиями и природными характеристиками.

Одной из особенностей гидрологии Ямала является наличие обширной сети рек и озёр. Реки полуострова Ямал включают в себя реки Обь, Пур, Таз и множество других притоков. Они являются важными водными артериями региона, обеспечивая снабжение водой для местного населения и флоры и фауны. Озёра на Ямале разнообразны по размерам и характеристикам. Они могут быть как пресными, так и солёными, в зависимости от источника питания и геологических особенностей. Многие озёра на Ямале имеют происхождение термокарстовых, образуясь в результате таяния мерзлоты. Эти озёра имеют важное значение для экосистемы и являются объектами исследования в контексте изменений климата и эмиссии метана. Одним из главных факторов, влияющих на гидрологические условия Ямала, является арктический климат. Зимы на Ямале холодные и продолжительные, с низкими температурами и обильными снегопадами. Таяние снега и ледяных образований происходит в течение короткого летнего периода, что приводит к формированию временных речных русел и термокарстовых озёр.

Важным аспектом гидрологии Ямала является также наличие мерзлоты. Мерзлота представляет собой слои замерзшего грунта, которые занимают значительную площадь на полуострове. Она оказывает влияние на гидрологический режим, задерживая воду на поверхности и создавая водные бассейны, включая озёра и болота.

Гидрологические условия Ямала играют важную роль в формировании экосистемы региона, поддержании биоразнообразия и обеспечении ресурсов для местного населения и животного мира. Они также являются объектом исследований в области гидрологии, климатологии и окружающей среды, в частности, для изучения эмиссии метана из термокарстовых озёр и её влияния на глобальное потепление.

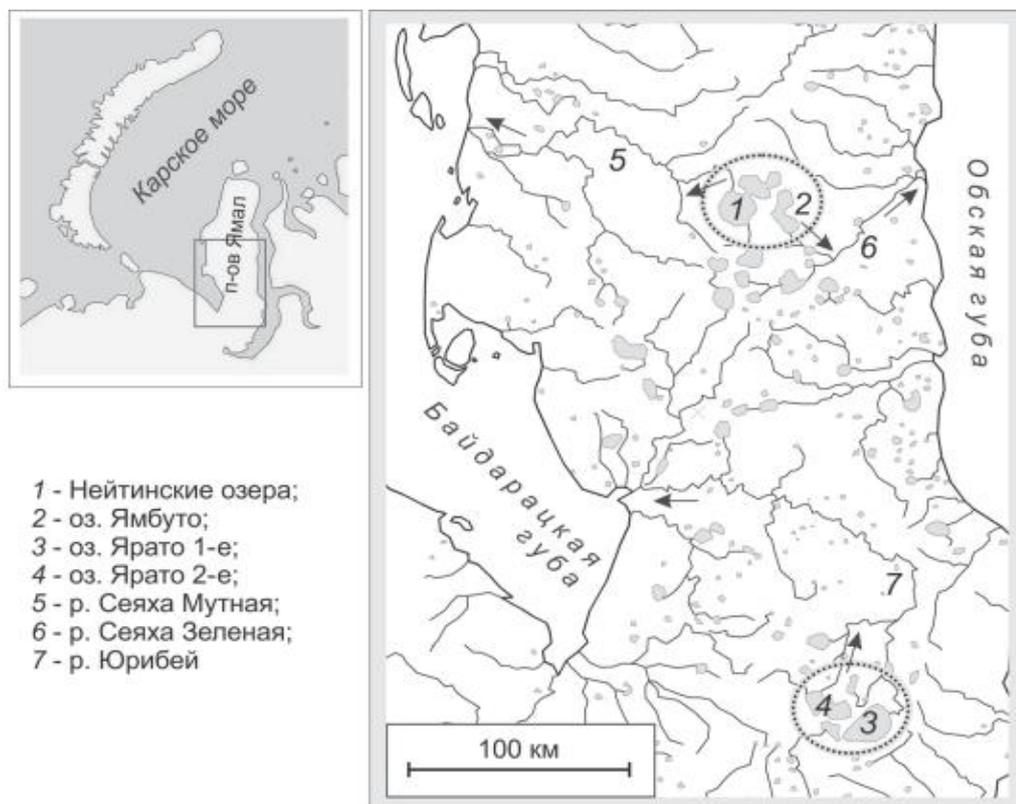


Рисунок 3. Гидрологическая сеть в исследуемом районе. (Иллюстрация к статье «Гидрологические особенности крупнейших озёр полуострова Ямал», труды Карельского научного центра РАН, №10.2017. С.3-16)

1.4 Использование ДДЗЗ и ГИС для исследования термокарстовых озёр п-ва Ямал

Дистанционное зондирование (ДЗ) является эффективным инструментом для исследования термокарстовых образований, таких как термокарстовые озёра. ДЗ позволяет получать информацию о поверхности Земли из космоса с помощью специальных сенсоров, установленных на спутниках.

Для исследования термокарста и динамики его изменений на Ямале и других регионах используются различные типы космических снимков. Важным инструментом является мультиспектральное ДЗ, которое предоставляет информацию о различных диапазонах электромагнитного спектра, включая видимый, инфракрасный и тепловой диапазоны.

Для изучения термокарстовых озёр и их динамики полезны следующие типы космических снимков:

1) Мультиспектральные снимки видимого спектра: Эти снимки позволяют визуализировать поверхностные особенности, такие как водные тела, таяние снега и ледяных покровов. Они также могут помочь в определении характеристик воды, таких как прозрачность и содержание взвешенных веществ.

2) Инфракрасные снимки: Инфракрасные данные помогают в идентификации и классификации растительности, особенно болот и заболоченных участков, которые могут быть связаны с формированием термокарстовых озёр. Изменения в распределении растительности могут указывать на динамику термокарста.

3) Тепловые снимки: Тепловые данные позволяют измерять и визуализировать температурные различия на поверхности Земли. Термокарстовые озёра могут иметь более высокую температуру, чем окружающая местность, что обусловлено процессами газообразования и активной гидрологией. Тепловые снимки могут помочь выявить такие горячие точки и оценить интенсивность термокарстовых процессов.

Кроме того, использование радарных снимков (SAR) может быть полезным для изучения термокарста, особенно при наличии облачного покрова или ограничений освещенности. Радарная технология позволяет получать снимки независимо от условий освещения и может обнаруживать поверхностные деформации, связанные с термокарстом.

В целом, комбинированное использование различных типов космических снимков и их анализ с помощью геоинформационных систем и специализированного программного обеспечения позволяет исследователям изучать термокарстовые образования, их динамику и влияние на окружающую среду..

Одной из наиболее известных групп исследователей была команда под руководством Сергея Зимова, ученого из Института физики атмосферы Российской академии наук. Они использовали данные спутникового ДЗ, в частности мультиспектральные снимки видимого и инфракрасного спектра, для обнаружения и изучения "голубых" озёр на Ямале.

Процесс обнаружения "голубых" озёр начинался с анализа мультиспектральных снимков, в которых исследователи искали характерные признаки таких озёр. Они обращали внимание на особенности цвета и отражения света от поверхности озёр, а также на изменения в растительности и окружающей местности.

Результаты исследования показали, что "голубые" озёра на Ямале обладают специфическими оптическими свойствами, которые отличают их от обычных озёр. Они имеют ярко-голубой или бирюзовый цвет, а иногда даже могут выглядеть почти черными. Это связано с высоким содержанием растворенного органического вещества, которое придает им такой оттенок.

Исследования позволили также выявить некоторые особенности географического распределения "голубых" озёр на Ямале. Они чаще всего образуются в низменных областях, где наблюдаются процессы таяния многолетней мерзлоты. Такие места

характеризуются высокой влажностью и насыщенностью водой в почве, что создает условия для развития термокарстовых процессов и формирования "голубых" озёр.

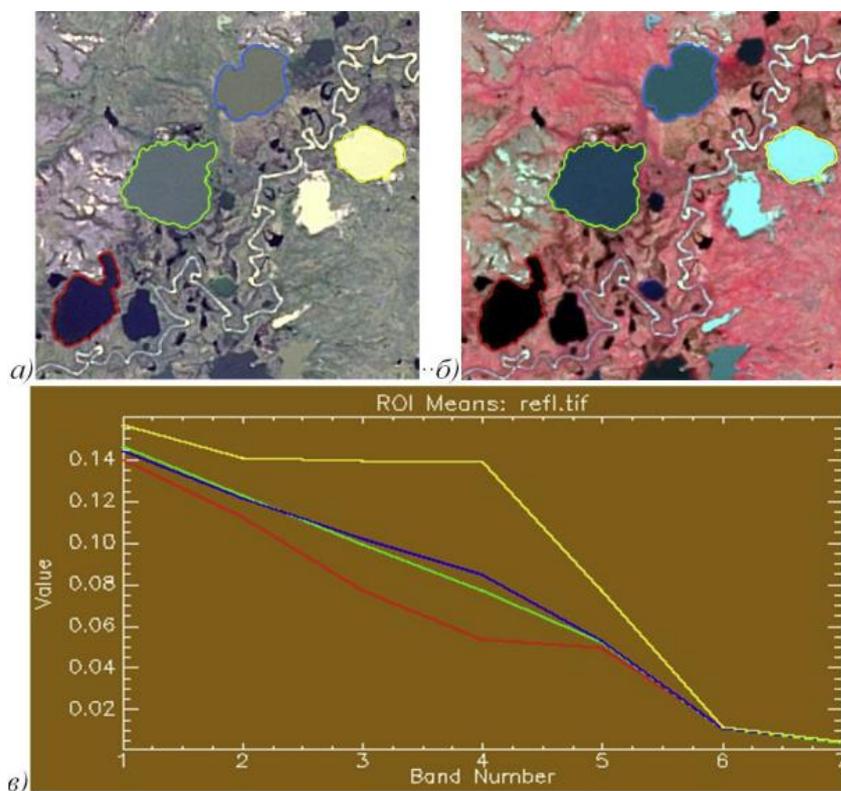


Рисунок 4. Визуальное представление озер на снимке Landsat-8 (а – видимые цвета, б – инфракрасный синтез) и кривые значений спектральной яркости (в), озеро с фоновыми значениями обозначено красным цветом, ID исходного снимка –

LC81650102013202LGN00

(Богоявленский В.И.1,2, Сизов О.С.1,2,3, Богоявленский И.В.1,2

,Никонов Р.А.1,2, Каргина Т.Н.1, Актуальные проблемы нефти и газа ■ Вып. 4(23) 2018, Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)

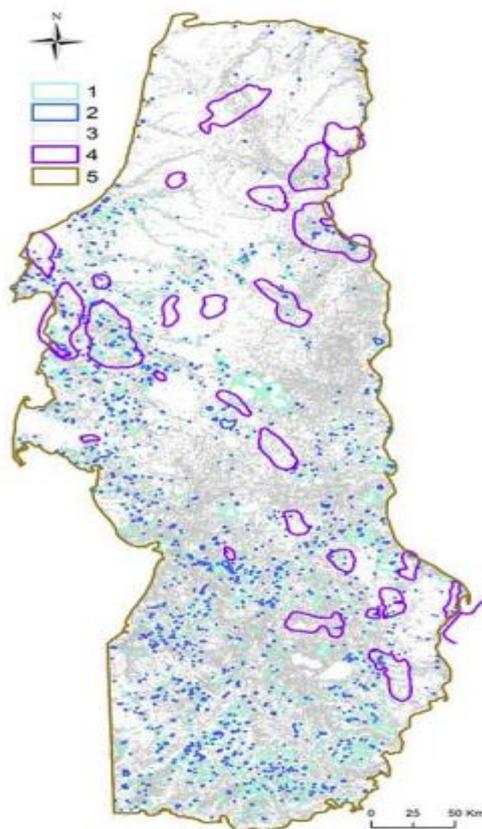


Рисунок 5. Пространственное распределение голубых озер на территории полуострова Ямал: 1 – голубые озера по состоянию на 1985 г.; 2 – вновь появившиеся к 2014 г. голубые озера; 3 – озера полуострова Ямал; 4 – границы известных месторождений УВ; 5 – граница территории исследований.

((Богоявленский В.И.1,2, Сизов О.С.1,2,3, Богоявленский И.В.1,2

,Никонов Р.А.1,2, Каргина Т.Н.1, Актуальные проблемы нефти и газа ▀ Вып. 4(23)

2018, Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)

Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)

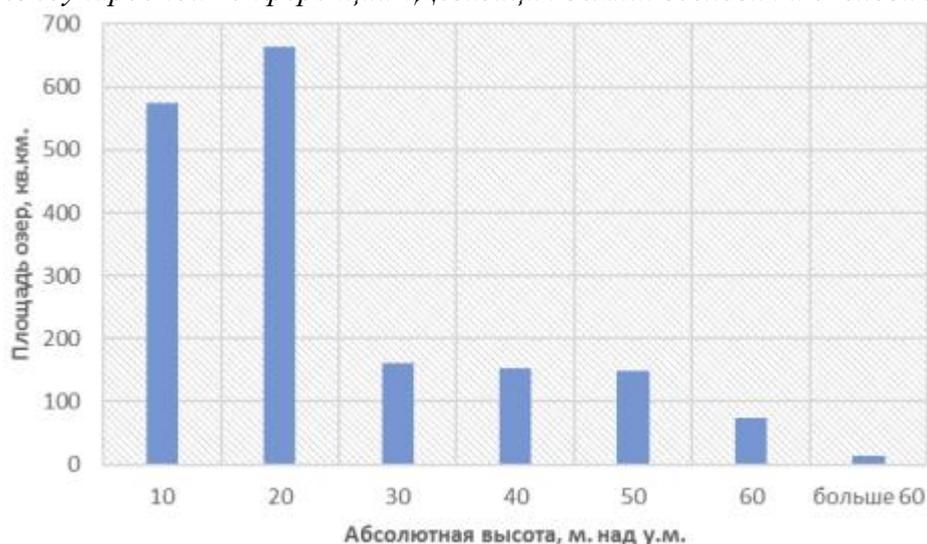


Рисунок 6. Высотное распределение голубых озер, по состоянию на 1985 г.

((Богоявленский В.И.1,2, Сизов О.С.1,2,3, Богоявленский И.В.1,2

*Никонов Р.А.1,2, Каргина Т.Н.1, Актуальные проблемы нефти и газа ■ Вып. 4(23) 2018, Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)
Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)*

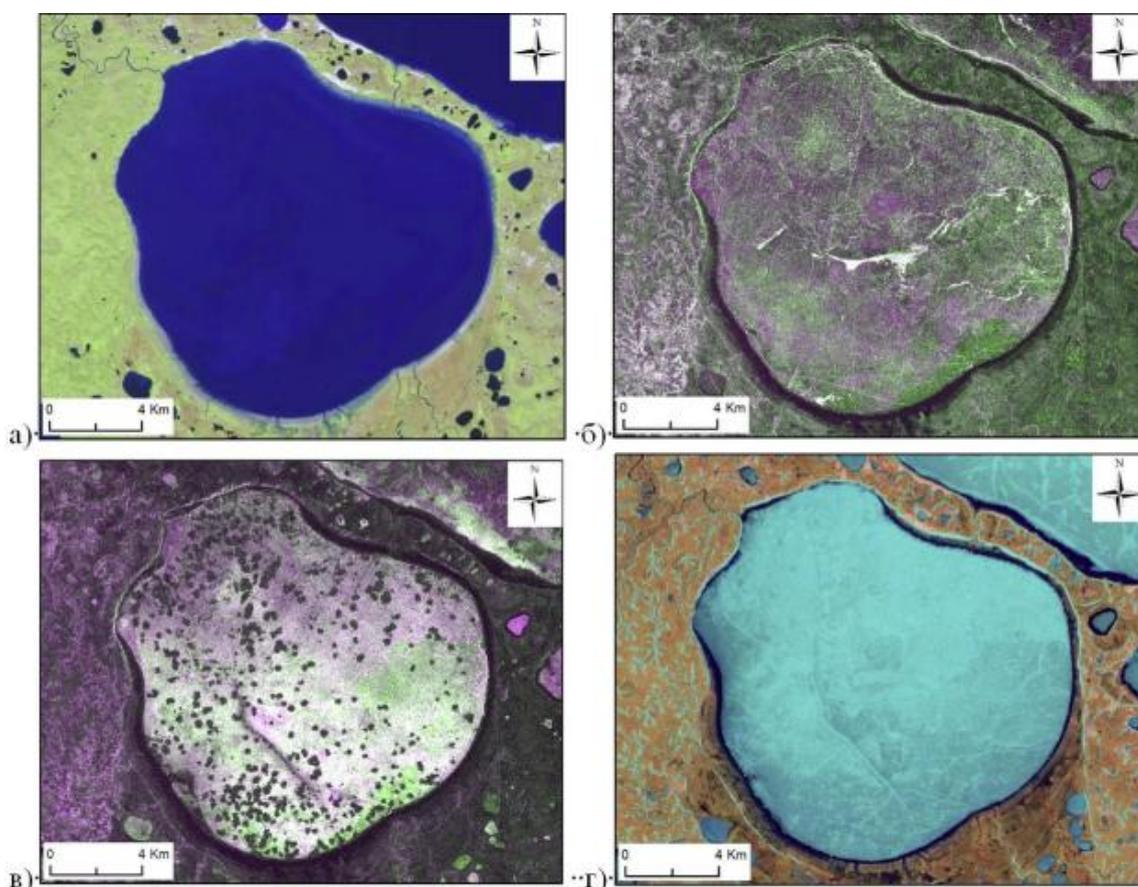


Рисунок 7. Поверхностная газодинамика озера Нейто: а) оптический снимок Sentinel-2 12.08.2016, б) радарный снимок Sentinel-1 06.12.2016, в) радарный снимок Sentinel-1 23.05.2017, г) оптический снимок Sentinel-2 18.06.2017

(Богоявленский В.И.1,2, Сизов О.С.1,2,3, Богоявленский И.В.1,2

*Никонов Р.А.1,2, Каргина Т.Н.1, Актуальные проблемы нефти и газа ■ Вып. 4(23) 2018, Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)
Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология – 2018»)*

В качестве объекта исследования выбрано озеро Нейто диаметром около 17 км и площадью около 225 км², которое имеет светло-голубой цвет при оптической съемке (рис. 7а). В предыдущих исследованиях было отмечено, что после схода льда на озере Нейто и некоторых других озерах Ямала периодически наблюдаются мутьевые потоки, связанные с активной газогидродинамикой.

Озеро Нейто на Ямале характеризуется особой газодинамикой на его поверхности. Важную роль в этом процессе играют газовые выделения, особенно метан, который может образовываться в озере и выбираться на поверхность.

Одной из особенностей поверхностной газодинамики озера Нейто является явление, известное как "голубые озера". Это название связано с ярким голубым цветом воды, вызванным выделением метана из донных отложений. Под воздействием газовых пузырьков, возникающих из-под дна, происходит всплытие метана на поверхность, что создает специфическую цветовую палитру.

Метан, выделяющийся из озера Нейто, является важным аспектом, так как этот газ является одним из основных компонентов парникового эффекта и может оказывать значительное влияние на изменение климата. Изучение поверхностной газодинамики и количественной оценки выбросов метана в атмосферу является важной задачей для ученых, чтобы лучше понять и прогнозировать его вклад в глобальное потепление.

Для изучения поверхностной газодинамики озера Нейто и количественной оценки выбросов метана исследователи применяют различные методы и инструменты. Одним из них является использование дистанционного зондирования, включая спутниковые снимки. Спутниковые данные позволяют ученым оценить размер и распределение газовых пятен на поверхности озера, а также выявить области наибольшей активности газовых выбросов.

Кроме того, исследователи могут использовать специализированные газовые анализаторы и пробы воды для оценки концентрации метана в атмосфере над озером и в его воде. Также проводятся гидрологические измерения, чтобы определить физические и химические параметры воды, которые могут влиять на газовые выделения.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР П-ВА ЯМАЛ С ПОМОЩЬЮ ДДЗЗ

2.1 Определение района исследования для выявления подверженных дегазации озёр

Для экспедиции по выявлению эмиссии метана в термокарстовых озерах полуострова Ямал были поставлены следующие задачи:

- 1) Определение района исследования.
- 2) Поиск коллекций космических снимков из открытых источников (USGS, Copernicus, SasPlanet, Esri/Retromap).
- 3) Сравнение космических снимков за разные периоды времени в осенне-весенний период.

Научно-исследовательский стационар «Васькины дачи» (рис. 8) расположен в Бованенковском НГКМ на железнодорожной линии Обская - Бованенково Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1). Площадь полигона научно-исследовательского стационара «Васькины дачи» составляет более 100 м². Стационар основан в 1988 году для научного обеспечения и проектирования железнодорожной линии Обская - Бованенково. С 1993 года он включен в программу мониторинга глубины сезонного протаивания – Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM), а затем и температуры пород – Thermal State of Permafrost (TSP). С 1996 года на этой территории научными сотрудниками Института криосферы Земли СО РАН ведутся наблюдения. Стационар служит опорной базой для изучения склоновых криогенных процессов в зоне типичных кустарниковых тундр. На стационаре в разное время в рамках отечественных и международных проектов проводились и продолжают геоботанические (Ребристая и др., 1993; Уолкер и др., 2012; Хитун и др., 2015), геоморфологические (Кизяков, 2005), гидрологические (Губарьков, Лейбман, 2010), ландшафтные (Хомутов, Лейбман, 2016), геохимические (Ukrainitseva и др., 2003; Дворников, 2016), измерения глубины протаивания на площадке CALM и другие исследования. В 2010 произошла прокладка железнодорожных путей Обская – Бованенково – Карская. Это сподвигло учёных на новые исследования природной среды и её динамики под действием техногенных факторов. В 2012 году на стационаре в рамках 10-й международной конференции по мерзлотоведению (TICOP) проводилась научная экскурсия с участием представителей разных стран (Лейбман и др., 2012). В 2014 году возле Арктического научно-исследовательского стационара была обнаружена газовая воронка, привлекавшая большое внимание ученых и вызвавшая интерес в научном сообществе. Это событие отражает важность и актуальность изучения геологических и климатических процессов в Арктике.

Газовые воронки представляют собой кратерообразные структуры, которые образуются в результате выбросов газа из недр Земли. Они могут возникать в различных геологических условиях и являются результатом нефтегазоносности и наличия газовых пузырьков под поверхностью. Обнаруженная газовая воронка вблизи Арктического научно-исследовательского стационара была описана как кратер диаметром около 50 метров. Изначально он был обнаружен с помощью аэрофотосъемки, а затем исследован более подробно на месте. Исследование газовой воронки включало различные методы и инструменты. Ученые собирали пробы воздуха и грунта, чтобы определить состав выбросов газа и изучить химические характеристики образования. Также были проведены геофизические измерения для получения

Результаты исследования позволили ученым установить, что газовая воронка была образована в результате выброса метана из недр Земли. Метан является сильным парниковым газом, и его выбросы в атмосферу могут оказывать значительное влияние на изменение климата. Поэтому изучение таких газовых воронок имеет важное значение для понимания климатических процессов и разработки стратегий управления газовыми выбросами.



Рисунок 8. Научно-исследовательский стационар «Васькины дачи». Яндекс карты¹
(70°17' с.ш., 68°54' в.д.)

Следующей областью исследования является район пересечения р. Еркатояха и ж\д Обская – Бованенково (рис. 9). В данной местности ранее уже проводились исследования эмиссии метана в термокарстовых озёрах.

¹https://yandex.ru/maps/?from=tabbar&ll=69.993925%2C70.167576&mode=search&sl=68.900000%2C70.283333&source=serp_navig&text=70.283333%2C68.900000&z=8.1



Рисунок 9. Область исследования неподалёку от р. Еркута. (Яндекс карты²)

2.2 Поиск коллекции космических снимков

После того, как были определены области исследуемой территории, был осуществлен запрос на корпоративную почту компании "СКАНЭКС". Эта компания является единственной в России и СНГ, которая имеет свою сеть станций для принятия сигнала со спутников. Также производит обработку обширного массива спутниковой информации по технологиям собственного производства и имеет в наличии свои сервисы в виде геопорталов для предоставления данных клиентам. Это обеспечивает потребителям доступ к данным по низкой цене и оперативное выполнение заказов.

В ответном письме прилагались ссылки на открытый источник с данными спутников SPOT 2/4/5 и источник (<https://search.kosmosnimki.ru/index.html?link=PF7WA>), где был выделен интересующий квадрат местности. После подтверждения целей исследования и профессиональной принадлежности был совершен заказ снимков с последующим получением логина и пароля для выгрузки данных.

К сожалению, выбранные снимки не подошли по своим характеристикам, а особенно разрешающей способности, так как они были предоставлены из открытых источников. Однако нельзя не выразить благодарность в содействии научному исследованию данную компанию.

После анализа более чем 200 космических снимков была проведена тщательная селекция наиболее подходящих, основываясь на проценте облачности менее 10% и отображении признаков дегазации малых и средних озёр полуострова Ямал. Несмотря на

²https://yandex.ru/maps/?from=tabbar&ll=68.964651%2C68.206332&mode=search&sl=68.900000%2C70.283333&source=serp_navig&text=70.283333%2C68.900000&z=11.7

среднюю точность в 10 метров на пиксель, были выбраны изображения из баз данных Retromap с использованием высокоточных спутниковых изображений QuickBird и WorldView 2. Были также использованы данные из источника World Imagery в геоинформационной системе Global Mapper в качестве дополнительного материала.

Лёд на поверхности озёр имеет свойство оставаться однородным в первое время после становления. Однако, к окончанию весеннего периода, на радарных снимках учеными были обнаружены некие локальные утолщения льда в виде пузырьков. Всему виной пузырьки газа, которые вмёрзая в лёд, или как их еще называют – линзы газа, оставляют подобные углубления. В то же время оптические характеристики данных озёр никак не изменяются. Заметные изменения наступают лишь при полном протаивании более тонких участков ледяной поверхности.

Несмотря на многократное увеличение космических снимков, нам удалось провести мониторинг термокарстовых озёр в области исследования. Наглядная разница в цвете озёр, предоставляет возможность предполагать о выявлении дегазации не только в осеннее-весенний период, но и в летний, благоприятный для экспедиционных работ.

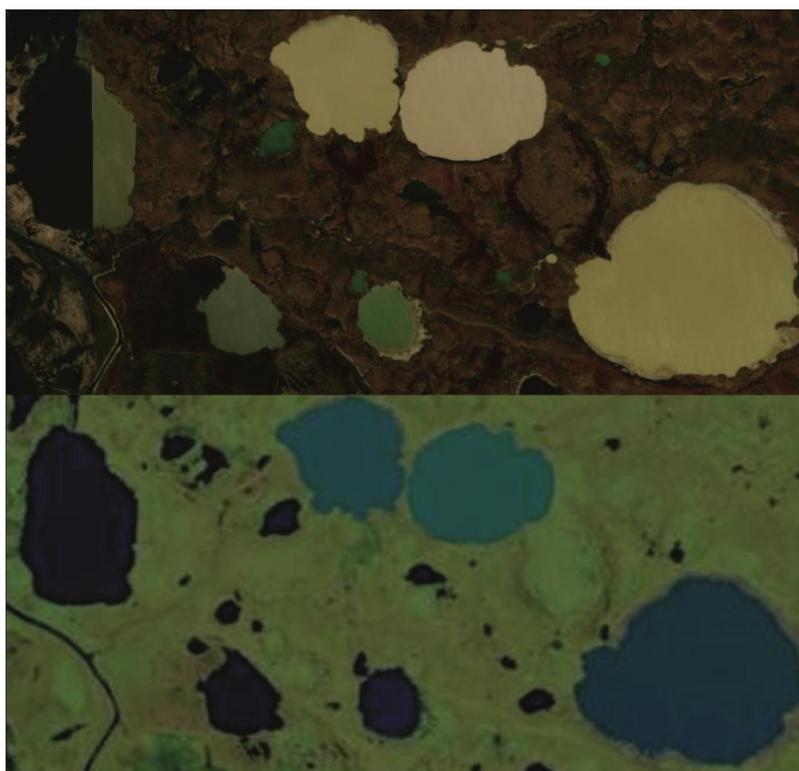


Рисунок 10. Характерная аномалия цвета озёр за разные промежутки времени, как свидетельство наличия дегазации в них. (Слева о. Юмбатато, справа о. ХаранганготоСверху снимок из базы данных Retromap – спутники QuickBird и WorldView2, снизу космоснимок из базы данных USGS – спутник Landsat-8, 16.08.2020 г.)

2.3 Выявление термокарстовых озёр по признакам дегазации метана

Выявление термокарстовых озёр, основанных на признаках дегазации метана, является важным аспектом исследования геологических и экологических изменений в Арктике. Термокарстовые озера образуются в результате таяния вечной мерзлоты и представляют собой важный источник выбросов метана в атмосферу. Их выявление и мониторинг помогают ученым понять и оценить вклад метана в глобальное потепление.

Одним из признаков дегазации метана является наблюдение газовых пузырьков, всплывающих на поверхность озера. Это может быть замечено визуально, когда на поверхности образуются маленькие или крупные пузырьки газа, которые поднимаются и выбрасываются в атмосферу. Это явление называется "газовыми выходами" или "метановыми выбросами".

Другим признаком дегазации метана является запах газа. Метан обладает характерным запахом, поэтому его присутствие может быть обнаружено путем нюха. Ученые могут осуществлять наземные или воздушные обследования, чтобы определить наличие запаха метана вблизи термокарстовых озёр.

Также важным признаком является анализ содержания метана в воздухе вблизи озерного бассейна. Используя специализированные газоанализаторы и пробы воздуха, ученые могут измерить концентрацию метана и определить его источник.

Другим методом выявления дегазации метана является анализ химического состава воды и осадков озера. Высокая концентрация метана в воде может указывать на активную дегазацию. Ученые собирают пробы воды и осадков, проводят их химический анализ и измеряют содержание метана.

Использование дистанционного зондирования (ДЗЗ) является важным инструментом для исследования термокарстовых озёр и их дегазации. ДЗЗ представляет собой метод сбора информации о объектах на Земле с помощью специальных сенсоров на борту спутников или летательных аппаратов. Этот метод позволяет получать данные о поверхности Земли, состоянии растительности, атмосферных условиях и других параметрах без прямого контакта с исследуемым объектом.

ДЗЗ обладает рядом преимуществ, которые делают его полезным для исследования термокарстовых озёр. Во-первых, он позволяет охватить большие территории, что особенно важно для изучения Арктики, где пространство огромно и доступность некоторых областей затруднена. Во-вторых, ДЗЗ обеспечивает возможность многократного наблюдения за территорией в разные временные периоды, что позволяет отслеживать динамику изменений и проводить сравнительные анализы. Также, ДЗЗ

позволяет получать данные на различных спектральных диапазонах, что дает возможность изучать разные аспекты и свойства территории.

Для исследования термокарстовых озер с помощью ДЗЗ используются различные типы сенсоров и спутниковых систем. Например, мультиспектральные сенсоры позволяют измерять отражение света от поверхности Земли в нескольких спектральных полосах, что позволяет анализировать состояние воды, растительности и грунта. Тепловые инфракрасные сенсоры позволяют измерять тепловое излучение и идентифицировать термальные аномалии, связанные с дегазацией метана.

С помощью ДЗЗ ученые могут выявлять признаки дегазации метана, такие как газовые выходы и газовые пятна на поверхности озерного бассейна. Они также могут анализировать изменения цвета и текстуры поверхности, что может свидетельствовать о процессах таяния вечной мерзлоты и формирования термокарстовых озер.

Примером использования ДЗЗ для исследования термокарстовых озер является работа ученых из Германии и России, которые в рамках проекта "Ландшафты Ямала" использовали спутниковые данные для определения распределения термокарстовых озер на полуострове Ямал. Они анализировали спутниковые снимки и проводили классификацию озерных водоемов с помощью спектральных индексов и теплового излучения. Результаты исследования позволили получить карту термокарстовых озер на Ямале и оценить их распределение и динамику во времени.

Когда метан или другие газы выбрасываются на поверхность озера, они могут вызывать тревогу в воде и создавать пузырьки или пленки на поверхности. Это может привести к механическому воздействию на воду и вызвать ее возмущение.

Помимо этого, выброс газа может также влиять на физико-химические свойства воды. Метан является гидрофобным газом, который плохо растворяется в воде. Когда он выбрасывается на поверхность озера, он может образовывать пленки или пузырьки, которые изменяют поверхностное натяжение воды. Это может привести к формированию мелких волн или возмущений, в результате которых мутность воды может измениться.

Кроме того, выброс газа может вносить изменения в химический состав воды. Метан является парниковым газом, и его выброс в атмосферу может привести к изменению окружающей среды, включая состав воды. Это может сказаться на концентрации растворенных веществ и создать условия для развития водорослей или других микроорганизмов, которые могут влиять на мутность воды (рис. 11) .

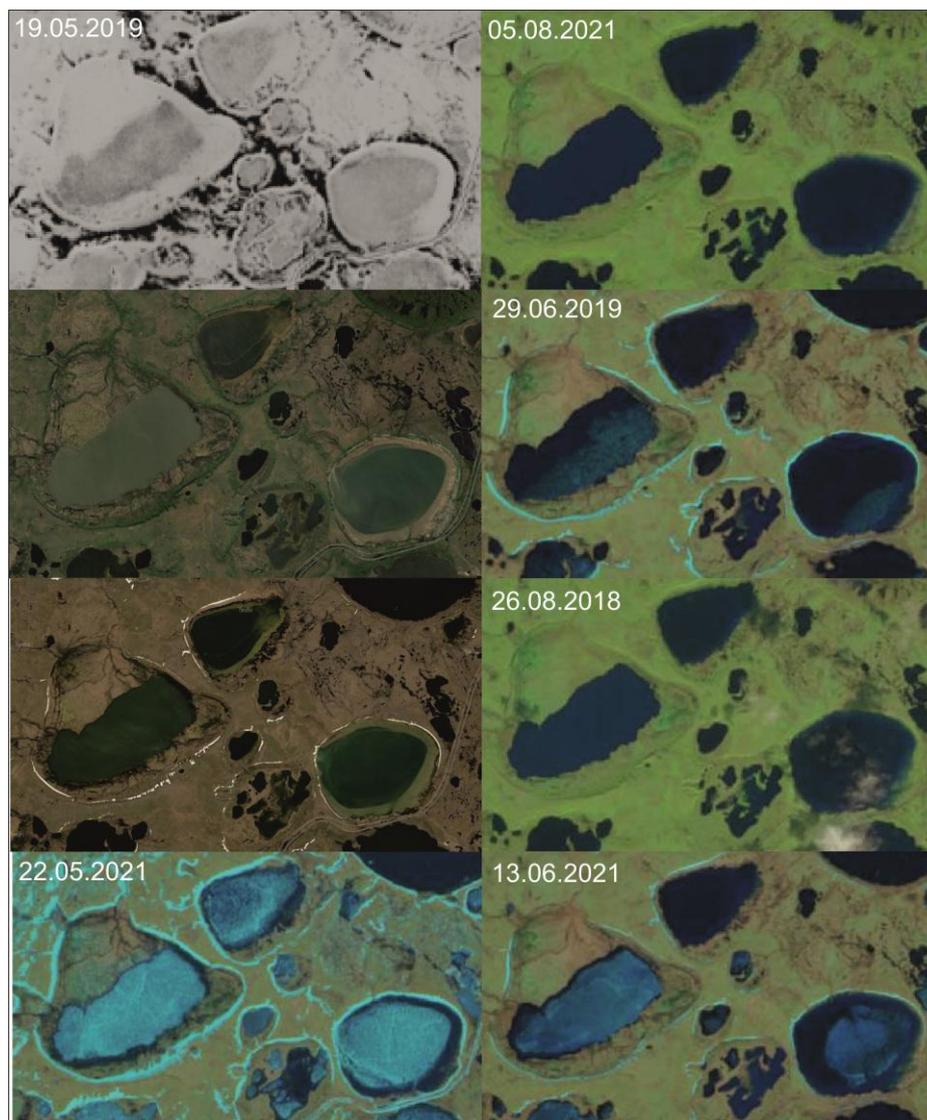


Рисунок 11. Мониторинг безымянных, предположительно кратерных озёр, расположенных между о. Синёнато (слева) и о. Луцато (справа). Датируемые снимки сделаны со спутника Landsat -8 (USGS), снимки без даты, из баз данных Retromap и GlobalMapper – World Imagery.

Однако степень изменения мутности воды в результате выброса газа может быть разной и зависит от многих факторов, включая интенсивность выброса, размер и форма озера, характер водной среды и другие. Поэтому для более точного понимания эффектов выброса газа на мутность воды необходимо проводить дополнительные исследования и

учитывать множество факторов.



Рисунок 12. Безымянные озёра в 7 км севернее от пересечения р. Ёркатояха и ж\д Обская – Бованенково. Наглядный разный цвет воды в одной озёрной системе, так же разная высота расположения озёр. (Global Mapper- World Imagery)

В экологии выделяются три основных типа озёр: олиготрофные, евтрофные и дистрофные. Эти типы озёр отличаются своими характеристиками и особенностями водной среды.

Олиготрофные озёра: Олиготрофные озёра характеризуются низким содержанием питательных веществ и низкой продуктивностью. В таких озёрах вода обычно прозрачна, мутность минимальна, а концентрация растворенного органического вещества низкая. Олиготрофные озёра часто имеют горные или ледникового происхождения и окружены хвойными лесами. В них обычно преобладают низкая биомасса фитопланктона и зоопланктона, а также виды рыб, приспособленные к низким питательным условиям.

Евтрофные озёра: Евтрофные озёра характеризуются высоким содержанием питательных веществ, таких как азот и фосфор, что обеспечивает высокую продуктивность. Вода в евтрофных озёрах обычно имеет зеленоватый оттенок, мутность может быть высокой из-за наличия большого количества взвешенных частиц. В таких озёрах часто процветает обилие фитопланктона, включая водоросли, что может вызывать эффект цветения воды. Также евтрофные озёра могут иметь обилие рыб и других животных, которые питаются фитопланктоном и другими организмами.

Дистрофные озёра: Дистрофные озёра характеризуются высоким содержанием растворенных органических веществ, таких как танины, которые придают воде тёмный цвет. Вода в таких озёрах обычно имеет коричневатый оттенок. Дистрофные озёра образуются в местах с высоким содержанием растительных остатков, например, в болотах или трясинах. В таких озёрах обычно преобладают водоросли и другие растения, а также

микроорганизмы, способные разлагать органические вещества. Рыбы и другие животные в дистрофных озёрах могут быть менее обильными из-за низкой доступности пищи.

Важно отметить, что типы озёр могут меняться в зависимости от условий и влияния человеческой деятельности. Например, загрязнение питательными веществами может привести к эвтрофикации озёр. Международный коллектив ученых из восьми стран, включая сотрудника Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН (Якутск), провел исследование процессов образования и окисления метана в одном из термокарстовых озер Севера. Это изучение даёт новые сведения о том, как может происходить выделение и поглощение метана в водных экосистемах Арктики, сообщает издание "Наука в Сибири". Ученые интересуются биогенным метаном, который производится преимущественно бактериями в анаэробных условиях, таких как донные отложения озер. Изначально считалось, что метан вырабатывается в донных отложениях и затем диффундирует до поверхности, где частично поглощается бактериями, а частично попадает в атмосферу. Долгое время считалось, что основным источником метана в термокарстовых озерах являются донные отложения, содержащие органическое вещество, подвергающееся разложению в анаэробных условиях. Однако более поздние исследования внесли ясность относительно источников метана внутри озёр.

Эпилимнион озера (верхний слой воды) может быть местом активного образования метана. В этом слое происходит фотосинтез фитопланктона, а затем органическое вещество попадает в нижние слои озера, где может происходить его разложение с образованием метана. Бактерии, живущие в эпилимнионе, могут осуществлять процессы метаногенеза и вносить свой вклад в образование метана в озере.

Также метан может поступать в озёра с притоками воды. Реки и ручьи, протекающие через болотистые и торфянистые участки, могут содержать растворенный метан и поставлять его в озёра. В таких случаях источником метана являются гидрологические системы, связанные с озёрной системой, а не только донные отложения.

Эти открытия подчёркивают сложность и многофакторность процессов образования и выделения метана в термокарстовых озёрах. Для более полного понимания и количественной оценки источников метана в озёрах необходимо проводить детальные исследования и учитывать различные факторы, такие как геологические, географические, биологические и климатические условия. Это и другие процессы, происходящие в озерах, участвуют в цикле метана. Исследование показало, что весь метан в эпилимнионе озера вырабатывается в нем же или поступает с боковым притоком воды.



*Рисунок 13. Y-образное озеро названное исследователями Sila.
(67.513991,86.593079) Global Mapper -World Imagery*

Исходя из цвета космического снимка образуются неоднозначные выводы о признаках эмиссии метана, так как внешне озеро не выделяется никакими признаками (рис. 13). Как считалось ранее, деградация вечной мерзлоты обязательным образом приводит к увеличению выброса метана из термокарстовых озёр, однако исследование зарубежных учёных совместно с российскими доказывает обратное. Эмиссия CH_4 может регулироваться в самом озере внутренним циклом этого газа и связь между потеплением и дегазацией гораздо сложнее.

Оптические и радиолокационные ДЗЗ с высокой периодичностью являются эффективным решением для широкого спектра задач, связанных с выделением поверхностной эмиссии метана в областях криолитической зоны России. Важным компонентом технологии дистанционного мониторинга газопроявлений являются дистанционные устойчивые признаки термокарстовых озёр. Они могут быть использованы для экспедиционных работ и детального картографирования необходимых участков. Аномальный цвет озёр и неоднородность снего-ледового покрова являются основными признаками дегазации территории. Несмотря на трудность получения точных и высокоточных снимков, материалы, доступные в общем доступе, могут быть использованы для анализа и выявления озёр с газопроявлениями. Прогноз надёжности газовой эмиссии может быть повышен за счет использования оптической съемки с расширенными мультиспектральными характеристиками (WorldView-3, Sentinel-2), радарной съемки с улучшенными показателями детальности (Sentinel-1 в режиме Spot) и оптической съемки с БПЛА. В современных реалиях ДЗЗ стали незаменимым инструментом в области мониторинга газопроявлений.

3. ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ЕРКУТА И ТЕРМОКАРСТОВОГО ОЗЕРА

3.1 Производство площадной аэрофотосъемки

Экспедиционная часть исследования проходила во время производственной практики. Практика проводилась при поддержке кафедры картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета в городе Лабытнанги, ЯНАО.

Полное наименование организации, в которой проходила производственная практик – Арктический научно-исследовательский стационар федерального государственного бюджетного учреждения науки института экологии растений и животных уральского отделения российской академии наук. Руководителем практики был младший научный сотрудник Орехов Павел Тимофеевич.

Арктический научно-исследовательский институт УрО РАН (АНИИ) - это научное учреждение, специализирующееся на комплексных исследованиях Арктического региона. Основан в 1992 году и является одним из ведущих институтов Российской академии наук, занимающихся изучением Арктики.

Институт имеет широкий спектр научных интересов и проводит междисциплинарные исследования в области геологии, геофизики, биологии, экологии, климатологии и других наук, связанных с изучением Арктики. Основная цель института - изучение природных и антропогенных процессов в Арктическом регионе. Активное участие в международных научных программах и проектах, сотрудничество с другими научными учреждениями и организациями по всему миру. Институт осуществляет свою деятельность как в лабораторных условиях, так и в экспедиционных и полевых исследованиях, чтобы получить непосредственные данные из самого Арктического региона.

Институт имеет собственную научную базу, включающую лаборатории, учебные и научно-исследовательские центры, а также современное оборудование для проведения анализов и измерений. Кроме того, институт имеет свои собственные научные суда и арктические станции, что позволяет проводить исследования в самых отдаленных и недоступных районах Арктики.

Арктический научно-исследовательский институт УрО РАН является ключевым центром изучения Арктики в России и вносит значительный вклад в научное понимание этого уникального региона, его природных процессов, экологических изменений и влияния человеческой деятельности.

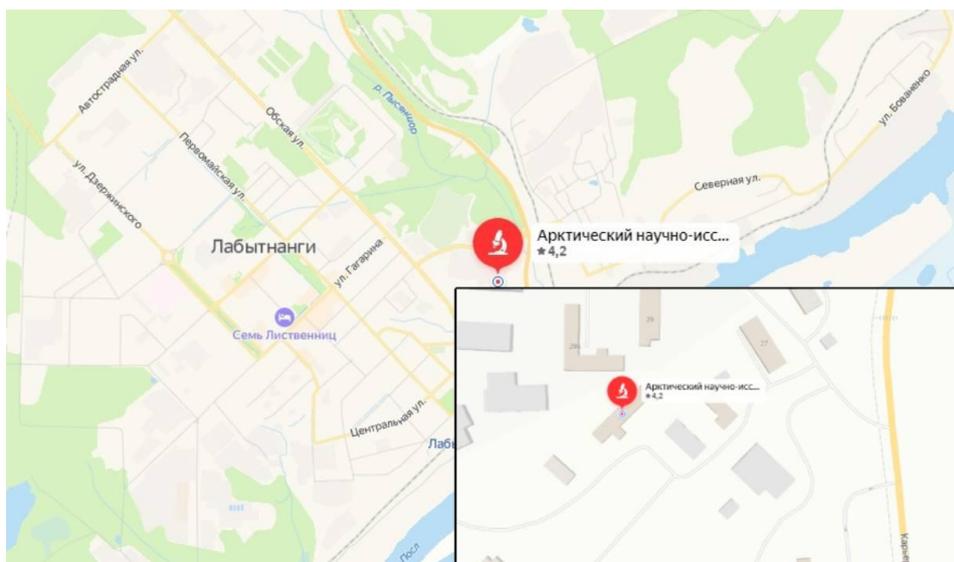


Рисунок 14. Расположение Арктического научно-исследовательского стационара г. Лабытнанги (Яндекс карты³)

За летний полевой сезон необходимо было изучить особенности термокарстовых озёр и других гидрологических объектов п-ва Ямал на предмет газопроявлений. Поэтому были выполнены следующие работы:

- проведена площадная съёмка с помощью БПЛА
- проанализированы полученные снимки и сделаны выводы
- разделены по тематическим направлениям и систематизированы массивы информации по научно-исследовательским работам прошлых лет

Как уже упоминалось ранее, полевой этап в исследовании такого типа просто необходим. С целью этого был составлен экспедиционный маршрут с обозначением ключевого участка. Для проведения площадной аэрофотосъёмки был проведён инструктаж по технике безопасности, а также совершены тестовые вылеты в безопасной зоне. Использовался беспилотный летательный аппарат мультироторного типа *Dji Mavic 2 Pro*.

³https://yandex.ru/maps/org/arkticheskiy_nauchno_issledovatel'skiy_statsionar_instituta_ekologii_rasteniy_i_zhivotnykh_ural'skogo_otdeleniya_rossiyskoy_akademii_nauk/141362663164/?from=tabbar&ll=66.410318%2C66.658920&source=serp_navig&z=15.73



Рисунок 15. БПЛА – Dji Mavic 2 Pro.

Дорожная сеть вдали от населённых пунктов развита очень плохо и подходит только для специализированной техники, поэтому маршрут до ключевого участка занял в одну сторону около пяти часов. В тундровой и лесотундровой зоне необходима высокая проходимость транспорта. Часто для передвижения по данной местности используется гусеничное шасси, но это влечёт за собой опасность нарушения верхнего плодородного слоя, что впоследствии может привести к скоротечной эрозии почв и оврагообразованию. Дабы этого избежать, в настоящее время стали передвигаться на так называемом ТРЭКОЛе. Транспорт экологический, имеет в своем арсенале колёсные шины крупного диаметра и сверхнизкого давления, что позволяет, проезжая по мхам и лишайникам не повреждать их структуры.

Прибыв на место ключевого участка, была совершена аэрофотосъемка термокарстовых озёр. Съемка безымянных озёр производилась как в надир, так и при 30° наклона. Важно было запечатлеть и структуру побережья, ведь именно там возможно было заметить признаки дегазации, что впоследствии дало бы нам возможность рассматривать данную местность совместно с изучением дополнительных материалов.

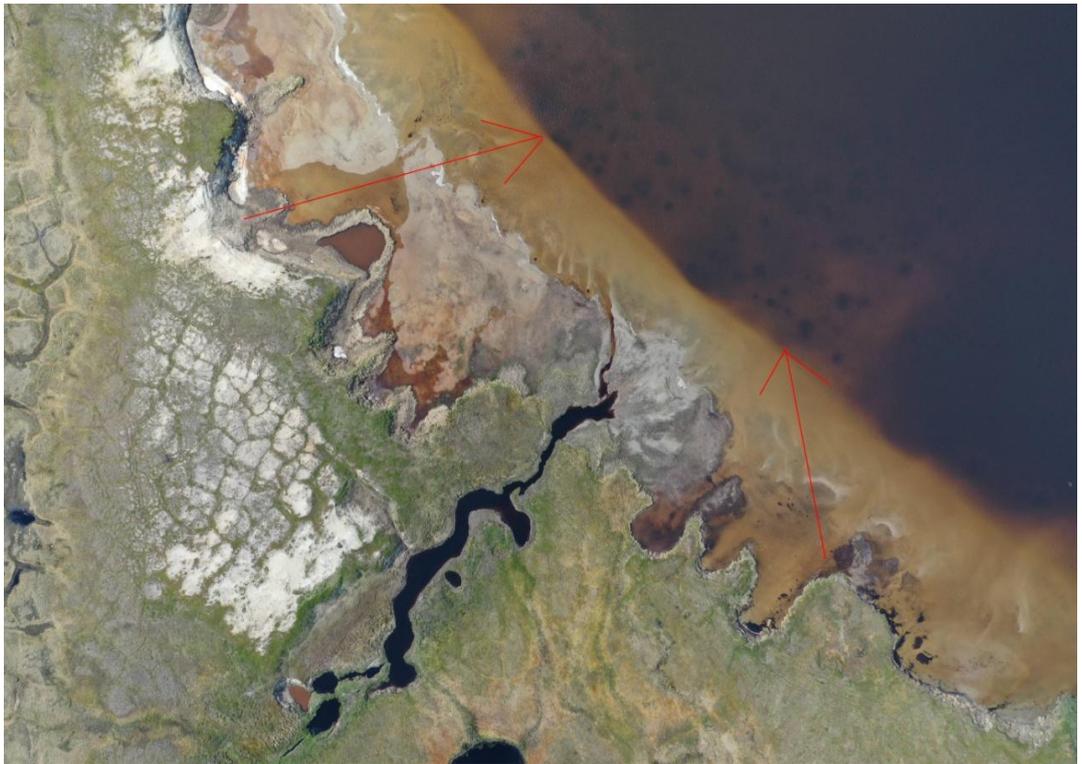


Рисунок 16. Видимые предположительно газовые грифоны в шельфовой части озера.



Рисунок 17. Подобные следы эмиссии метана в более мелком озере.

На аэрофотоснимках (рис. 16, 17) четко отмечаются округлые углубления в поверхности дна, располагающиеся в прибрежной зоне термокарстового озера. Данные грифоны не отображаются на космоснимках найденных ранее, возможно это связано с

меняющейся мутностью воды, а также из-за среднего пространственного разрешения космических снимков.

Данное исследование имеет смысл подкрепить наземными замерами уровня метана у поверхности озера, но из-за труднодоступной местности, исследуемые озёра находились вне пешей доступности с имеющимся оборудованием.

15 ноября в Институте космических исследований РАН проходила конференция, посвященная современным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса, на круглый стол которой, были написаны тезисы и подготовлен доклад. Апробация материала на данной конференции произвела интересную дискуссию относительно генезиса данных темных пятен на дне озера, что открыло поле для последующего анализа уже в камеральных условиях.

Также по материалам исследования была написана статья в сборник XIX БГФ-2023, проходящая с 7-го по 9-ое апреля в стенах Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

3.2 Применение методов геоинформатики для анализа данных и создания карт на изучаемую территорию

В данном исследовании основным направлением поиска было решено установить геологическую составляющую, так как, говоря о генезисе эмиссии метана в термокарстовых озёрах, одним из основных источников является тектонический газ, просачивающийся благодаря разломам и различным морфологическим структурам древних пород.

О чём упоминает в своей работе «Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири» О.С. Сизов. Исходя из генезиса это может быть либо местный внутримерзлотный биохимический газ, либо глубинный катагенетический угольный или сланцевый газ, привнесенный в интервал криолитозоны. Катагенетический газ – это газы, образующиеся в процессе углефикации органического вещества, в основном метан. Наибольшие выделения газов связаны с зонами тектонических нарушений.

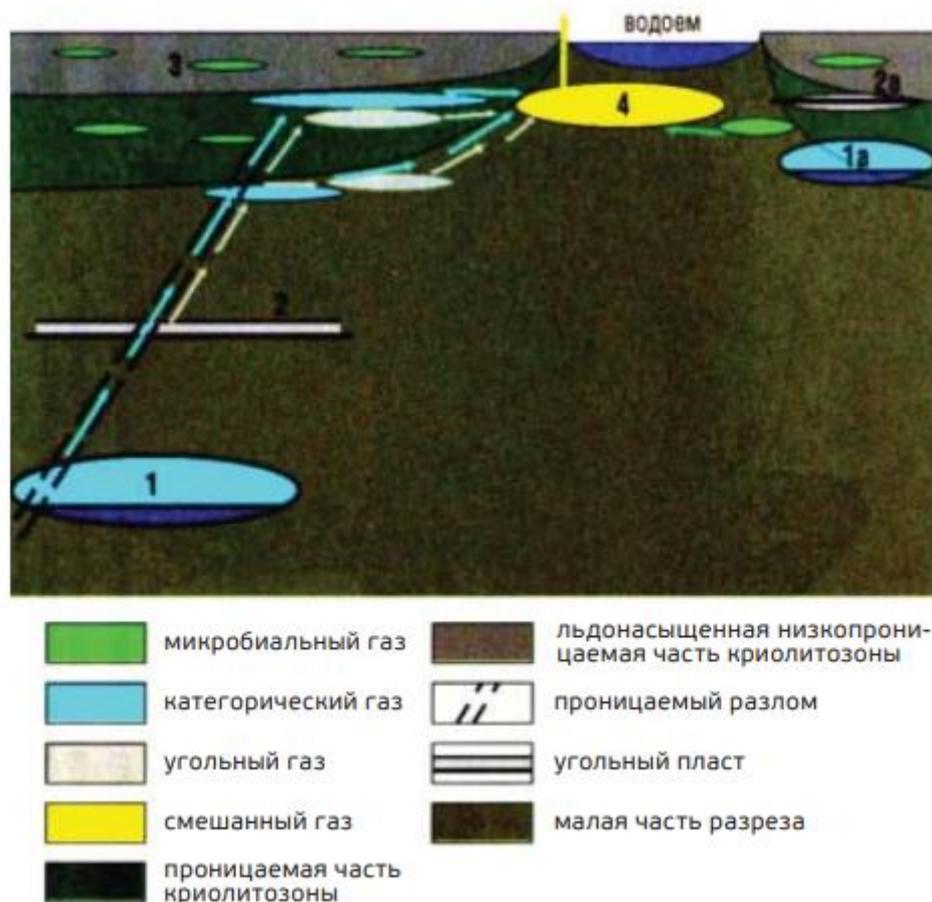


Рисунок 18. Схема миграции и аккумуляции природного газа в криолитозоне (Геоматика №1, 2015, С. 53-68, О.С.Сизов. «Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири»)

Если рассматривать другие виды генезиса газопроявлений в термокарстовых озёрах, необходимо так же учитывать и газогидраты. Газогидраты – это такие соединения, образующиеся при определенных низких температурах и давлении. Они имеют как свою зону стабильности, в которой залегают в недрах земли, так и зону так называемой метастабильности. Дело в том, что реликтовые газогидраты не способны образовываться в современных реалиях, а способны лишь существовать в законсервированном виде в толщах земной поверхности, в зоне метастабильности газовых гидратов (ЗМГ). Метастабильные газогидраты, которые находятся ближе к поверхности, чем стабильные, очень сильно подвержены внешнему воздействию, как температурному так и барическому, вдобавок к этому, естественное повышение температуры климата за последние десятилетия значительно повышает риск высвобождения данных газовых гидратов. Поэтому в качестве дополнительного картографического источника было решено взять карту газоопасности Ямальской НГО (Е.В. Перлова. «Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона»).

Дополнительно были изучены научные материалы, которые можно отнести к первоисточникам по данной тематике, например, такие как патенты Кузина Л.И., который первым предложил определять газопроявления дистанционно, с помощью аэрофотосъемки, чтобы уменьшить расходы на поиск полезных ископаемых.

Союз Советских Социалистических Республик  Государственный комитет С С С Р по делам изобретений и открытий	О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ	(11) 868684
	(61) Дополнительное к авт. свид-ву - (22) Заявлено 09.01.80 (21) 2866145/18-25 с присоединением заявки № - (23) Приоритет - Опубликовано 30.09.81. Бюллетень № 36 Дата опубликования описания 30.09.81	(51) М. Кл. ³ G 01 V 9/00 (53) УДК 550.84 (088.8)
(72) Авторы изобретения	Э.М. Прасолов, И.Н. Толстихин, В.П. Якуцени и И.Л. Кузин	
(71) Заявитель	Всесоюзный нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт (ВНИГРИ)	
(54) СПОСОБ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОИСКА ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА		

Рисунок 19. Патент. Способ геохимического поиска залежей нефти и газа.

(Патент, Кузин.И.Л. Описание изобретения к авторскому свидетельству, 1981 г.)

Одним из главных источников геологических картографических материалов был выбран Каталог растров Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ). На сайте имеется удобный доступ к обширным материалам картографических растровых данных, по различным тематикам. Были выбраны: карта прогнозов на нефть и газ на квадрат R-42. Карту разломной тектоники было решено взять более старого образца, а именно Карту разломов территории СССР и сопредельных стран в масштабе 1:2 500 000.

Имея в наличии несколько картографических основ, сперва необходимо привязать данные растры в геоинформационной системе QGIS. Сделать это можно несколькими способами. Для картматериалов с имеющейся математической основой, это делается с помощью встроенного инструмента привязки. На растре ставятся 4 точки и им задаются соответствующие координаты. Главное соблюсти проекции проекта будущей карты и проекцию привязываемого изображения. В нашем случае проект создается в местной системе координат на зону N42 в проекции WGS-84-UTM. Для привязки картматериала без математической основы или же аэрофотоснимков использовался модуль Freehand georeferencer. Модуль Freehand Georeferencer в QGIS позволяет производить ручную привязку растровых изображений, используя произвольные точки на

изображении для определения координатных значений. Для привязки изображения с помощью этого модуля необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) Открыть изображение в QGIS и выбрать модуль Freehand Georeferencer.
- 2) Установить соответствующие настройки привязки, такие как система координат, которая будет использоваться для привязки изображения.
- 3) Используя инструмент "Add Point" в модуле Freehand Georeferencer.
- 4) После выбора нескольких точек на изображении, модуль Freehand Georeferencer будет автоматически производить растяжение и перенос изображения, чтобы соответствовать указанным координатам.
- 5) Проверить точность привязки изображения, используя функцию "Fit to Display" в модуле Freehand Georeferencer.
- 6) После завершения привязки изображения сохранить изменения и использовать привязанное изображение для дальнейшего анализа в QGIS.

Для фонового отображения, было выбрано 2 темы для 2 соответствующих карт (рис. 20,21). Первая содержит в себе прогнозирование на нефть и газ, а именно ресурсная оценка потенциально нефтегазоносных территорий и акваторий распределенная по удельной плотности начальных суммарных геологических ресурсов углеводородов в тыс. тонн на кв. км. Для второй карты было выбрано значение мощности зоны метастабильности газогидратов в метрах. Были нанесены имеющиеся разломные структуры а так же геосинклинальные складчатые области. Это необходимо нанести поверх каждой карты, чтобы приурочить местоположение ключевого участка к тектонически активным областям.

После успешной привязки всех необходимых картографических материалов была выделена граница будущей карты с помощью инструмента построения векторных геометрических фигур с учётом масштаба 1:150 000, таким образом, чтобы ключевой участок находился в центре. Был выделен порядок векторизации необходимых слоев. Это необходимо для корректной визуализации в дальнейшем. В качестве способа отображения для карт был выбран количественный фон. Данные для отображения были занесены в атрибутивную таблицу, пронумерованы, а также им было присвоено название. Настройка отображения количественного фона и подробное оформление было выполнено с помощью инструмента – «Символизация по уникальным значениям». Так как векторизация вручную оставляет угловатые границы полигонов и линий была совершена автоматическая генерализация. Для этого на верхней панели QGIS был включён инструмент «Упрощение объекта» в «Дополнительных инструментах оцифровки». Сглаживание производилось по 4 итерациям, пока был не достигнут нужный эффект. В

среднем было сделано 2-3 сглаживания. Излишняя генерализация ведёт за собой повышение количества точек, впоследствии увеличивающее размер проекта и усложняющее работу с ним.

Нанесение линейных объектов на карту было так же подвержено генерализации. Важной составляющей являлось оформление разломов. Для этого был составлен линейный знак в виде фиолетовой пунктирной линией с показателем «сброса» в необходимой части карты. Это было сделано с помощью «маркерной линии».

После окончания векторизации необходимо оформить картографические данные, полученные в результате синтеза нескольких картографических материалов. На карты была нанесена математическая основа, состоящая из географической сетки и масштаба как числового, так и линейного. Широтную географическую сетку было решено взять с шагом 15 минут, а долготную с шагом в 30 минут. Это сделано для того, чтобы линии были равноудалены от краев карты и не перегружали карту, так как она является тематической и географическая сетка является дополнительной информацией, а не основной. Необходимо нанести подписи озёр, имеющие название. Гидронимы необходимо наносить в соответствии с правилами, шрифт Georgia, курсив, цвет тёмно-синий, наклон вдоль гидрологического объекта. Легенда карты была составлена автоматически не совсем верно, и имела в наличии ненужные объекты, использованные для облегчения векторизации на предыдущем этапе, поэтому её нужно было отредактировать. В ней на первое место подняты главные показатели, отражённые на карте, и уже впоследствии второстепенные.

Одной из базовых операций в ГИС картографировании считается оверлейная операция. Она позволяет объединять и анализировать различные слои геоданных для получения новой информации. Основной концепцией является перекрытие геометрических объектов. Оверлейные операции выполняются путём сравнения геометрических объектов из разных слоёв и проведением различных анализов между ними. Так, например, мы сравнили местонахождение ключевого участка с озером, над которым проводилась площадная съёмка с отображением геологических структур, разломов и геосинклинальных комплексов. Данная операция позволяет создать композитную карту, из которой, в ходе изучения и анализа можно извлечь информацию, недоступную при отдельном изучении используемых материалов. В качестве инструмента оверлейной операции использовалось «Объединение» (Union). Объединение оперирует с двумя или более слоями данных и создаёт новый слой, который включает в себя геометрические объекты из всех исходных слоёв. Например объединение слоя зон

метастабильности газогидратов со слоем геосинклинальных комплексов создаст новый слой с полигонами, которые сочетают в себе геометрию из обоих источников.

Геоинформационный метод визуализации данных обеспечивает ряд преимуществ над ручным составлением аналоговых карт. В ГИС можно быстро создавать и изменять картографические продукты. Вместо ручного рисования и внесения изменений на бумажных картах, в ГИС можно легко изменять параметры и добавлять новые данные, а изменения автоматически применяются ко всем связанным элементам карты. Это позволяет значительно экономить время и повысить эффективность работы. ГИС позволяют создавать и визуализировать карты на разных масштабах и проекциях, а также комбинировать различные слои данных для создания комплексных картографических продуктов. Это обеспечивает большую гибкость и возможность адаптировать карты под различные потребности и цели. можно проводить различные анализы данных, выполнять пространственные запросы и создавать новые слои данных на основе геоинформационных операций. Кроме того, с помощью ГИС можно создавать интерактивные карты, которые позволяют взаимодействовать с данными, отображать информацию по клику на объекты карты и создавать динамические визуализации. данные хранятся в цифровой форме, что облегчает их обновление и распространение. Новые данные могут быть быстро добавлены в систему и отображены на карте, а также легко переданы другим пользователям через файлы или сетевые сервисы. И конечно, что немаловажно ГИС позволяют интегрировать и визуализировать различные типы географических данных, такие как векторные, растровые, спутниковые изображения и другие геоинформационные слои. Это позволяет создавать более полные и комплексные карты, которые могут содержать множество различных данных.

В будущих исследованиях планируется продолжить картографический анализ данных территорий, а также распределить данный способ на схожие участки при наличии соответствующих аэрофотоснимков.

После подробного изучения составленных картографических изображений было принято решение отредактировать неточности и ошибки. Обозначение градусной сетки было решено отобразить внутри рамки, тем самым увеличив расстояние для легенды. Это позволит сделать название подгрупп знаков полужирным шрифтом, тем самым выделив его на фоне обозначения самих знаков. Цвет штриховки геологических включений, а именно среднепалеозойские магматические интрузивные включения было решено изменить на красный. Такой цвет не сильно бросается в глаза и позволяет ограничить использование чёрного цвета только на надписях и сносках. У обозначения гидрографических шрифтов была увеличена нижняя граница минимально используемого

на карте кегля, вследствие необходимости увеличения читаемости карты. Ошибкой было также оставить картографические изображения без названия, поэтому они были нанесены на центр верхней рамки. Масштаб был смещен вниз, за рамку карты. Также, чтобы уменьшить резкость изображения и сместить фокус, контур качественного фона был уменьшен до 0,1 мм, а цвет сменился с чёрного на коричневый. У градусной сетки было принято решение изменить шаг широтного отображения с 15 до 9 минут. Это позволит отобразить 2 линии сетки вместо одной и тем самым даст пользователю возможность диапазон шага широт на сетке. Написание буквенных обозначений D₂-C₁ (Среднедевонский нижнекаменноугольный геосинклинальный комплекс) было решено наносить структурировано, для наглядного отображения фонового распространения, так как может сложиться ложное впечатление о приуроченности данного комплекса к какому либо фоновому цвету. Цвет был изменен на более коричневатый оттенок.

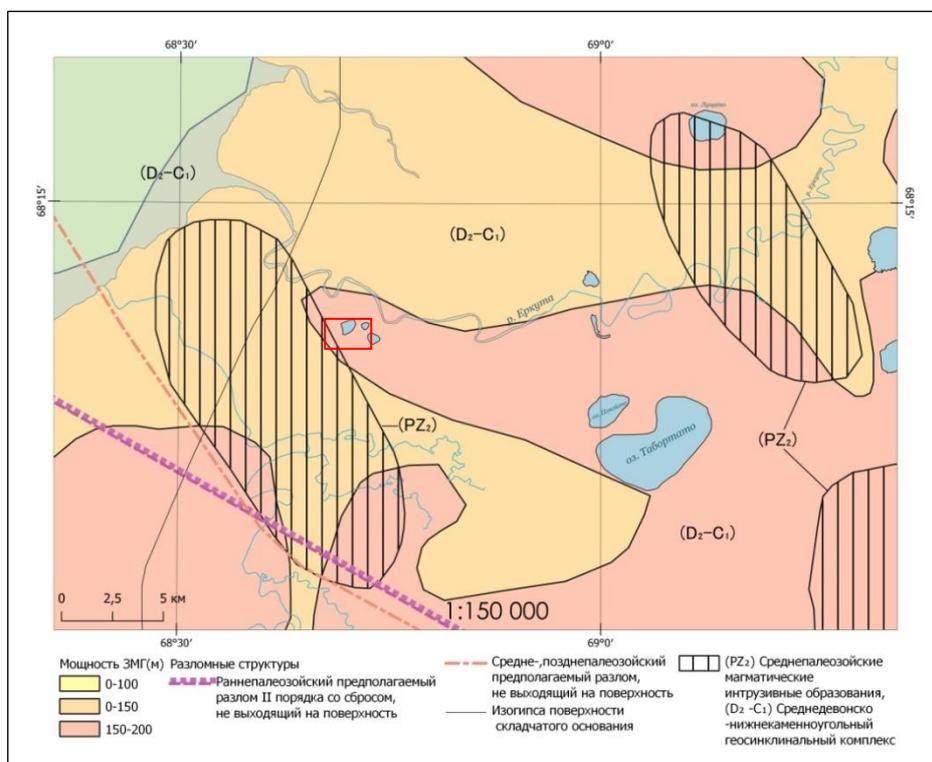


Рисунок 20. Карта соотношения местоположения ключевого участка с зоной метастабильности газогидратов и разломной тектоники.

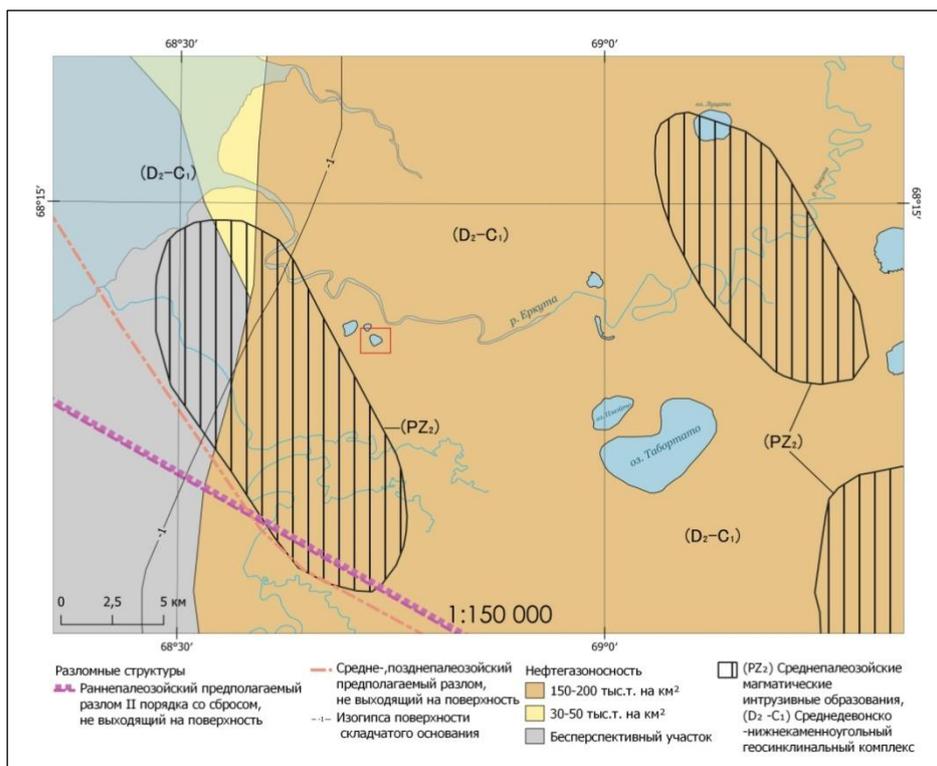


Рисунок 21. Карта соотношения ресурсной оценки прогнозов на нефть и газ совместно с разломной тектоникой

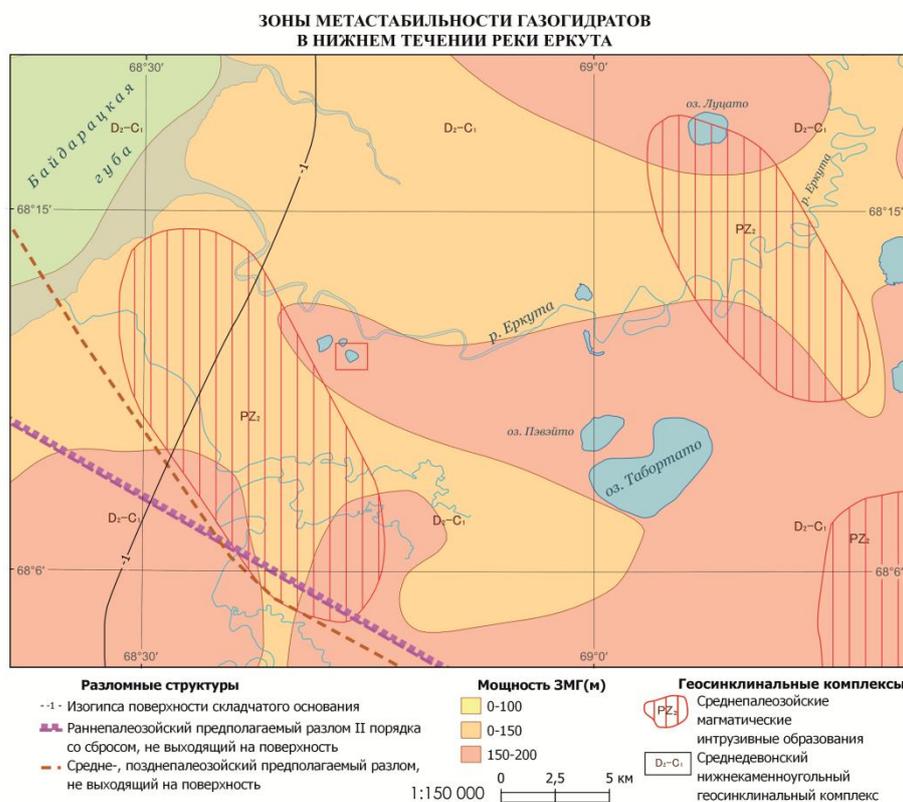


Рисунок 22. Карта зон метастабильности газогидратов и разломной тектоники после редактирования.

**ЗОНЫ РЕСУРСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗОВ НА НЕФТЬ И ГАЗ
В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЕРКУТА**

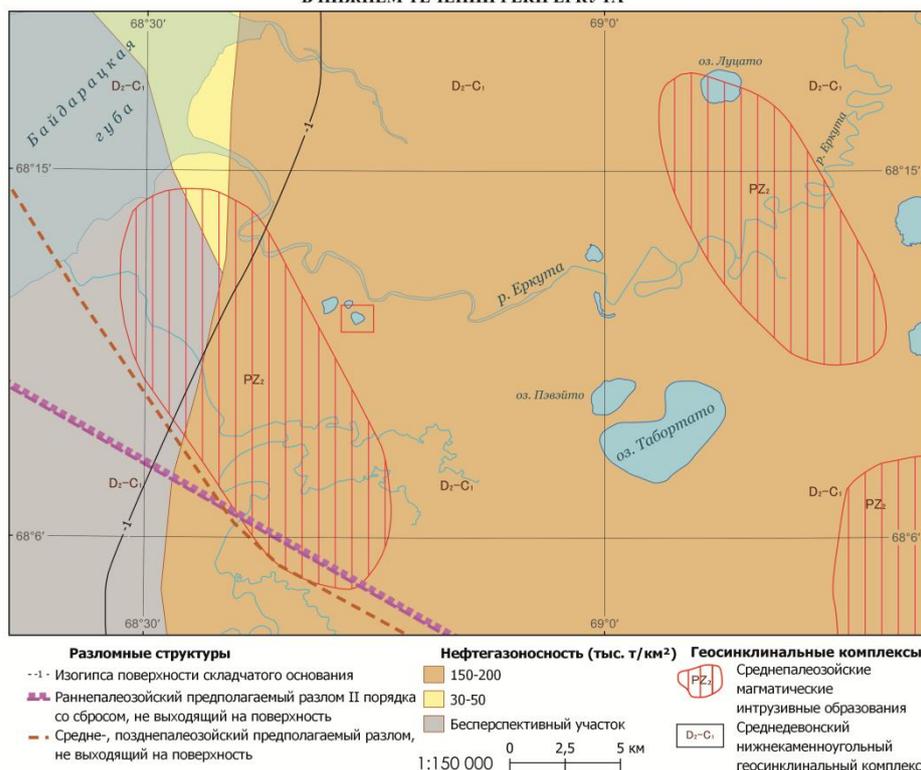


Рисунок 23. Карта зон ресурсной оценки прогнозов на нефть и газ после редактирования.

3.3 Систематизация массивов данных

В процессе исследования термокарстовых озёр полуострова Ямал и эмиссии метана из них было необходимо провести анализ большого количества научных статей, патентов, карт и схем, связанных с данной темой. Все эти данные были собраны из разных источников, в том числе из электронных баз данных и библиотек.

Для удобства использования данных и оптимизации процесса исследования было принято решение систематизировать массивы данных. Они были разделены по тематическим направлениям, таким как: геоинформатика, дистанционное зондирование, оптические и радиолокационные ДЗЗ, геология, геохимия и другие. Данные были структурированы и сохранены в хранилище на локальном диске, что позволило быстро и удобно находить необходимые материалы.

Помимо систематизации данных, был проведен комплексный анализ литературы, который позволил получить наиболее полную картины исследуемой проблемы. Анализ включал в себя сбор, обработку и анализ данных из разных источников, а также критическую оценку полученных результатов. В результате были выявлены преимущества и недостатки различных методик исследования термокарстовых озер и эмиссии метана.

За время исследования было проанализировано 197 научных работ, включая статьи, публикации, диссертации и тезисы. Также в работе учтены схематические наработки научных сотрудников Арктического научно-исследовательского стационара.

Для систематизации научных трудов по я использовал следующий подход:

1. Определение ключевых слов и фраз, связанных с темой исследования. Это включало в себя термины, связанные с геоинформатикой, дистанционным зондированием, метаном, термокарстовыми озерами, полуостровом Ямал и т.д.

2. Поиск научных статей и публикаций, связанных с темой исследования. Я использовал различные научные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и Google Scholar, для поиска научных работ по ключевым словам.

3. Оценка качества научных статей и публикаций. Я оценивал качество научных работ, используя различные критерии, такие как их авторитетность, актуальность, научную значимость и прочие факторы.

4. Организация научных работ по темам исследования. Я разделил научные работы на несколько тем, связанных с геоинформатикой, дистанционным зондированием, метаном, термокарстовыми озерами, полуостровом Ямал и т.д.

5. Создание библиографической файловой системы. Я создал файловую систему на локальном жестком диске, которая содержала информацию обо всех научных работах, связанных с темой исследования, которые удалось найти.

6. Анализ научных работ. Я проанализировал научные работы, используя различные методы, такие как кластерный анализ и геостатистические методы, для выявления закономерностей в распределении эмиссии метана в термокарстовых озерах полуострова Ямал.

Тематика научных работ сильно варьировалась. Были изучены такие темы как: «Подземные и поверхностные воды криолитозоны» С.М. Фотиев, «Становление и информативные возможности дистанционных методов изучения природной среды» В.С. Юдин, «Газовые гидраты полуострова Ямал» Е.В. Перлова, «Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворённому органическому веществу» Ю.А. Дворников, «Особенности растворения подозёрных таликов на территории Бованенковского месторождения» Г.В. Ананьева, «Зоопланктон разнотипных водоёмов полуострова Ямал в 2015 году» Н.И. Ермолаева и другие.

В целом, систематизация данных и изучение литературы позволили получить более полную и точную картину изучаемой проблемы. Это в свою очередь позволит более эффективно и точно проводить дальнейшие исследования на данную тему.

3.4 Анализ полученных данных и формирование выводов

На рисунке 21 мы можем наблюдать отчетливое нахождение ключевого участка в зоне метастабильности газогидратов 150-200 метров, что говорит нам о наличии газовых гидратов на достаточно большой глубине. Этот факт даёт понять, что газовые грифоны в шельфовой части озера с низкой вероятностью вызваны газовыми гидратами. Есть вероятность, что газ имеет микробный генезис, или же разломный. Так же вблизи ключевого участка находится граница интрузивных магматических образований, что говорит нам о тектонической активности в прошлом, и о возможности формирования, так называемого глубинного газа.

Рисунок 22 нам говорит о том, что проходящая изогипса поверхности складчатого образования проходит в относительной близости различных нефтегазоносных территорий. Изогипсы могут использоваться в геологических исследованиях для определения геологической структуры и формирования складчатых образований. Складчатые образования, в свою очередь, могут создавать благоприятные условия для накопления и запасов нефти и газа. Например, в результате деформаций и сжатия в складчатых областях могут образовываться ловушки для нефти и газа, такие как антиклинальные структуры или залежи в разломах.

Данный геоинформационный метод анализа данных позволяет соотнести между собой факторы углеводородного образования, тектонической нарушенности, а также внешние признаки дегазации на примере термокарстовых озёр.

Из результатов исследования можно сделать вывод о том, что комплексный подход, включающий анализ геологических, тектонических и аэрофотоснимков, является эффективным методом для изучения эмиссии метана в термокарстовых озерах. Такой подход позволяет получить точные данные о расположении и характеристиках газопроявлений, что может быть использовано для разработки практических рекомендаций по уменьшению углеродного следа и более эффективному управлению природными ресурсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании мы использовали данные дистанционного зондирования Земли и методы геоинформатики для изучения термокарстовых озер на полуострове Ямал. На основе полученных данных мы выяснили, что термокарстовые озера на полуострове Ямал являются одними из наиболее активных источников метана в атмосфере.

Комплексный подход, включающий анализ геологических, тектонических и аэрофотоснимков, а также использование методов геоинформатики, является перспективным методом для изучения эмиссии метана в термокарстовых озерах на полуострове Ямал.

Проведение площадной аэрофотосъемки является одним из важнейших этапов исследования, ведь ни одни другие снимки из открытых источников не смогли обеспечить подобное качество снимков, что позволило зафиксировать наличие предполагаемых газовых грифонов в шельфовой части термокарстового озера.

Были выполнены следующие задачи:

1. Проведён обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования, включающий анализ основных научных работ в данной области.
2. Определены методы исследования, в частности, рассмотрено применение спутниковой съемки и геоинформационных технологий.
3. Проведён сбор данных о геоморфологии, гидрологии, геохимии и биологических особенностях термокарстовых озер Ямала.
4. Проанализированы полученные данные и выявлены закономерности и особенности, свойственные термокарстовым озерам Ямала.
5. Составлены производные карты на основе синтеза геологических, тектонических, нефте-газоносных и полевых данных на территорию нижнего течения реки Еркута.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций по уменьшению углеродного следа и более эффективному управлению природными ресурсами.

В дальнейшем исследовании термокарстовых озер на полуострове Ямал необходимо использовать новейшие технологии Дистанционного зондирования земли и методы геоинформатики, чтобы получать более точные данные о распространении метана в атмосфере и о влиянии термокарстовых озер на климатические процессы.

Также, необходимо проводить совместные исследования с учеными из разных стран, чтобы расширить знания в этой области и найти новые пути решения проблем, связанных с изучением термокарстовых озер и их влиянием на климатические процессы.

Данное исследование прошло апробацию в качестве написания научных тезисов на конференцию «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в Институте космических исследований РАН. Также была написана статья в сборник XIX Большого географического фестиваля 2023.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 1 // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
2. Богоявленский В. И., Мажаров А. В., Пушкарев В. А., Богоявленский И. В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал. Предварительные результаты экспедиции 8 июля 2015 г. // Бурение и нефть. — 2015. — № 7—8. — С. 8—13. 7.
3. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43.
4. Брыксина Н. А., Полищук Ю. М. Исследование точности дистанционного измерения площадей озер с использованием космических снимков // Геоинформатика. — 2013. — № 1. — С. 64—68.
5. Буданцева Н. А. Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазокоденсатных месторождений полуострова Ямал. — Т. 1: Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения. — Тюмень; С.-Петербург: Недра, 2006. — С. 235—248.
6. Верещака Т. В., Зверев А. Т., Сладкопечев С. А., Судакова С. С. Визуальные методы дешифрирования. — М.: Недра, 1990. — 344 с.
7. Кузин И. Л. Голубые озера областей гумидного климата // Изв. Рус. геогр. о-ва. — 2001. — Т. 133, вып. 3. — С. 44—57.
8. Кузин И. Л. О природе аномальных озер — показателей скоплений углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазонакопления в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137
9. Кузин И. Л. Масштабы эмиссии природных газов в Западной Сибири // Известия РГО. — 1999. — Т. 131.— Вып. 5.— С. 24—35
10. Кузин И. Л., Любина Ю. Н., Рейнин И. В. Газопроявления на озерах Западной Сибири и их связь с месторождениями нефти и газа // Тектонические критерии выделения и прогноза Использование данных ДЗЗ 68 GEOMATICS №1'2015 зон нефтегазоносности (с использованием космической информации). — Л.: ВНИГРИ, 1990 — С. 117—127.
11. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Аспект пресс, 2004. — 184 с

12. Масуренков Ю. П., Слёзин Ю. Б., Собисевич А. Л. Газовые шлейфы у острова Беннетта // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2013. — № 3. — С. 86—95.
13. Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы международной конференции. — Новосибирск: Наука, 1997. — С. 259—269.
14. Протасьева И. В. Аэрометоды в геокриологии. — М.: Наука, 1967. — 196 с.
15. Ривкин Ф. М. Метан в мерзлых породах и прогноз его выделения при потеплении климата и техногенных нарушениях поверхности // Изв. РАН. Сер. геогр. — 1998. — № 2. — С. 64—75.
16. Ривкин Ф. М. Газосодержание в верхних горизонтах мерзлых пород // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). — М.: ГЕОС, 2003. — С. 133—146
17. Якушев В.С. Газовые гидраты в отложениях материков и островов / В.С. Якушев, Е.В. Перлова, Н.А. Махонина и др. // Российский химический журнал. — 2003. — Т. XLVII. — № 3. — С. 80–90.
18. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas // GeoExPro [London]. — 2015. — Vol. 12, № 5. — Oct. — P. 74—78.
19. Engram M., Walter K. M., Meyer F. J., Grosse G. Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice // Canadian J. of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 38, № 6. — P. 667—682. — doi:10.5589/m12-054.
20. Fitzgerald D., Riordan B. A. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis. — 2003. — Vol. 35, № 1. — P. 30—35
21. Paltan H., Dash J., Edwards M. A refined mapping of Arctic lakes using Landsat imagery // Int. J. Remote Sens. — 2015. — 36. — P. 5970—5982. — doi:10.1080/01431161.2015.1110263.
22. Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al. Off shore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // Geoph. Res. Let. — 2013. — Vol. 40. — P. 1—6. — doi:10.1002/grl.50735.
23. Reusch A., Loher M., Bouffard D. et al. Giant lacustrine pockmarks with subaqueous groundwater discharge and subsurface sediment mobilization // Geoph. Res. Let. — 2015. — 13 May. — doi:10.1002/2015GL064179.

24. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic lakes // Science. — 2005. — 308. — P. 1429. — doi:10.1126/ science.1108142.

Ресурсы сети Интернет

25. Геологическая служба США: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Дата обращения 01.12.21)

26. Компания СКАНЕКС: <https://www.scanex.ru/> (Дата обращения 20.01.22)

27. Старые карты городов России и Зарубежья: <http://retromap.ru/> (Дата обращения 20.02.22)

28. Снимки Sentinel: <https://apps.sentinel-hub.com> (Дата обращения 15.03.22)

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Карта зон метастабильности газогидратов в нижнем течении реки Еркута.

ЗОНЫ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОГИДРАТОВ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЕРКУТА



Разломные структуры

- -1- - Изогипса поверхности складчатого основания
- Раннепалеозойский предполагаемый разлом II порядка со сбросом, не выходящий на поверхность
- Средне-, позднепалеозойский предполагаемый разлом, не выходящий на поверхность

Мощность ЗМГ (м)

- 0-100
- 0-150
- 150-200

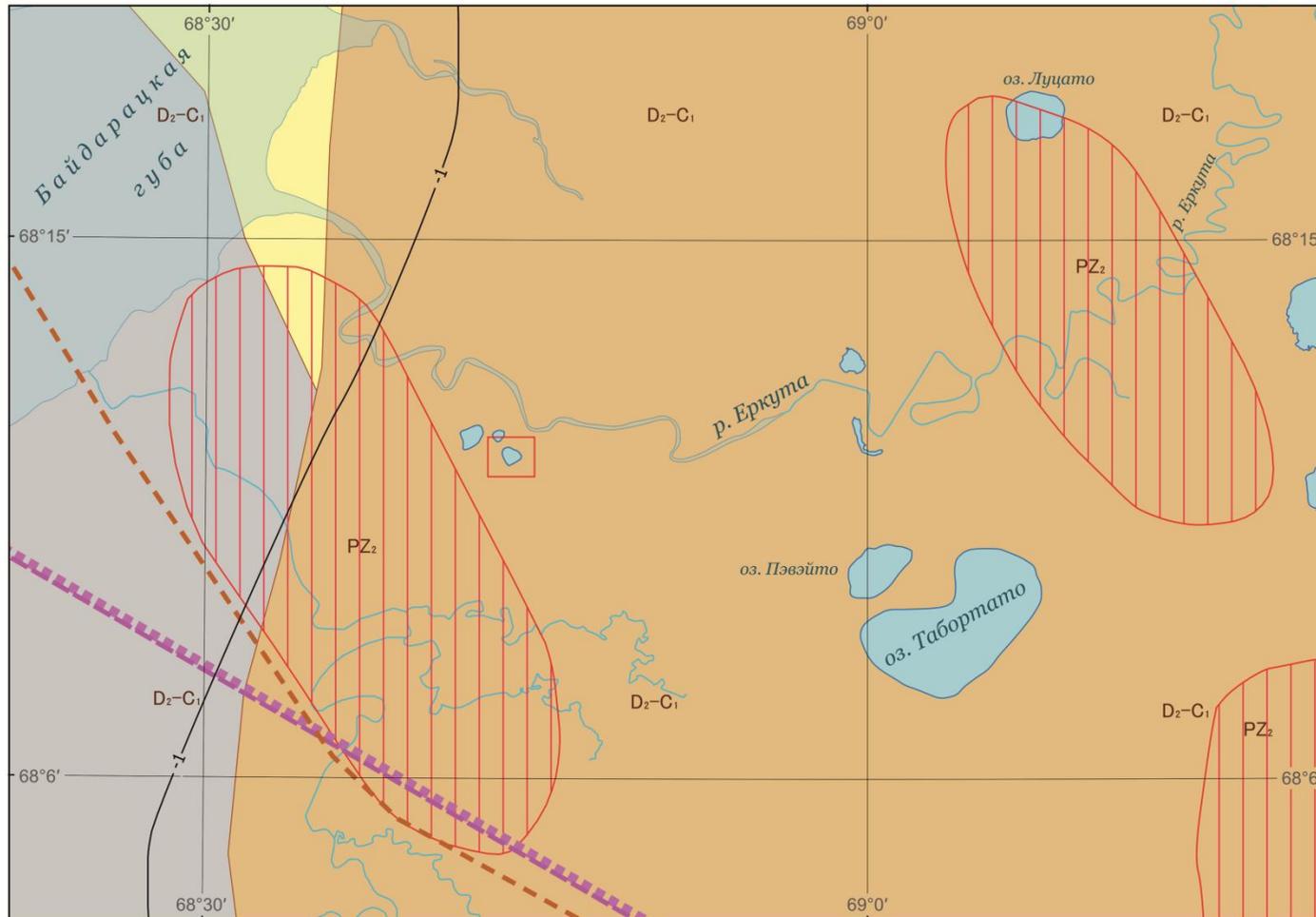
1:150 000

Геосинклинальные комплексы

- Среднепалеозойские магматические интрузивные образования
- Среднедевонский нижнекаменноугольный геосинклинальный комплекс

2. Карта прогнозов на нефть и газ в нижнем течении реки Еркута.

**ЗОНЫ РЕСУРСНОЙ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗОВ НА НЕФТЬ И ГАЗ
В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЕРКУТА**



Разломные структуры

- 1-- Изогипса поверхности складчатого основания
- Раннепалеозойский предполагаемый разлом II порядка со сбросом, не выходящий на поверхность
- - - Средне-, позднепалеозойский предполагаемый разлом, не выходящий на поверхность

Нефтегазоносность (тыс. т/км²)

- 150-200
 - 30-50
 - Бесперспективный участок
- 1:150 000

Геосинклинальные комплексы

- PZ₂ Среднепалеозойские магматические интрузивные образования
- D₂-C₁ Среднедевонский нижнекаменноугольный геосинклинальный комплекс