

Санкт-Петербургский государственный университет

ШОРНИКОВА Анна Владимировна

Выпускная квалификационная работа

Эмиссия метана с озер зоны распространения сплошной и островной многолетней мерзлоты

Уровень образования: *Магистратура*

Направление 05.04.06 «*Экология и природопользование*»

Основная образовательная программа ВМ.5797 «*Геоэкология: мониторинг, природопользование и экологическая безопасность*»

Научный руководитель:
доцент кафедры геоэкологии и природопользования,
Институт Наук о Земле,
к. г. н. Федорова И.В.

Рецензент:
заведующая и руководитель лаборатории гидрофизики,
Институт водных проблем Севера, КарНЦ РАН,
к.г.н., Здоровеннова Г.Э.

Санкт-Петербург
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Глава 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТНОМНОГО ОКРУГА И ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)..... | 6 |
| 1.1 Географическое положение | 6 |
| 1.2 Геология..... | 7 |
| 1.3 Рельеф | 9 |
| 1.4 Климатические условия | 12 |
| 1.5 Гидрология | 15 |
| 1.6 Почвенный покров..... | 16 |
| 1.7 Растительный мир..... | 17 |
| 1.8 Многолетняя мерзлота | 19 |
| 1.9 Деятельность человека и его воздействие на территорию | 20 |
| Глава 2. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ | 24 |
| Глава 3. РОЛЬ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМАХ..... | 30 |
| 3.1 Роль растворенного кислорода в воде | 30 |
| 3.2 Роль растворенного метана в воде и донных отложениях..... | 31 |
| 3.3 Роль биогенных элементов и органических веществ | 32 |
| Глава 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ | 33 |
| 4.1 Методы отбора и консервации проб воды | 33 |
| 4.2 Проведение экспресс-анализа на точках отбора проб | 36 |
| 4.3 Определение биогенных элементов в водных объектах | 38 |
| 4.4 Измерение эмиссии метана с поверхности озер | 40 |
| 4.5 Отбор проб и измерение концентрации метана донных отложений | 42 |
| 4.6 Содержание органического вещества в донных отложениях..... | 45 |
| 4.7 Определение растворенного окрашенного органического вещества в воде | 47 |
| 4.8 Изотопный состав вод | 50 |
| 4.9 Корреляционный анализ | 53 |
| Глава 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ | 54 |
| 5.1 Результаты гидрохимических экспресс-анализов | 54 |
| 5.2 Результаты полученных концентрации биогенных элементов | 54 |
| 5.3 Эмиссия метана с поверхности водных объектов | 57 |
| 5.4 Концентрации метана в донных отложениях..... | 61 |
| 5.5 Содержание органического вещества в донных отложениях..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| 5.6 Растворенное окрашенное органическое вещество в воде водных объектов..... | 70 |
| 5.7 Изотопный состав вод | 74 |
| 5.8 Корреляционный анализ параметров водных экосистем..... | 81 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 85 |
| БЛАГОДАРНОСТИ | 87 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 88 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 99 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 103 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 104 |

ВВЕДЕНИЕ

По данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, общее потепление наблюдается на всей территории Российской Федерации во все сезоны за период наблюдений с 1976 по 2022 г. Скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры (линейный тренд) составила $+0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад за весь период – 56 %). Наибольшая скорость роста среднегодовой температуры отмечается в арктической зоне России – на побережье Северного Ледовитого океана, особенно в азиатской части России ($+0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет). В целом для арктического региона линейный рост среднегодовой температуры за 30 лет составил около $2,64\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Доклад об особенностях..., 2023; Арктическая зона..., 2020). Сходные данные были получены международной группой исследователей, где в результате температура в Арктике за последние пятьдесят лет повысилась на $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с общим средним увеличением на $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Post et al, 2019).

А в южной части азиатской части России в период с 1994-2010 гг. отмечалась тенденция похолодания (до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет на юге Сибири), которая завершилась в 2010 г., и начался очень слабый рост температур в весенний и осенний периоды (Доклад об особенностях..., 2023).

Одним из важных индикаторов и фактором ускорения потепления в Арктике является таяние многолетней мерзлоты. Она покрывает примерно 65 % территории России, и это составляет около 30 % от общей площади зоны многолетней мерзлоты в мире. В процессе таяния многолетней мерзлоты высвобождаются накопившиеся в замерзшей органике парниковые газы, в частности углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4) (Глобальная климатическая угроза..., 2020).

Согласно данным Международного энергетического агентства IEA (International Energy Agency) глобальная эмиссия метана оценивается в 570 млн. тонн (795 млрд. м), включая около 40 % из природных источников и 60 % из антропогенных (McGlade et al., 2020). С учетом этих данных доля газа термокарстовых озер составляет 3,3-8,5 % общей эмиссии, или 8,25-21,25 % эмиссии из природных источников (Богоявленский, Сизов и др., 2020).

Масштабное увеличение эмиссии метана в атмосферу усиливает трансформацию криогенных рельефов Арктики. Процессы, происходящие в арктической зоне, требуют полноценного научного изучения. При этом особо актуальное направление – изучение процессов дегазации Земли, имеющих в Арктике «взрывную» специфику (Богоявленский, Сизов и др., 2019).

Целью работы является изучение эмиссии метана с водных объектов зоны сплошной и островной многолетней мерзлоты, в связи с деградацией мерзлоты, связанной с антропогенным и климатическим изменениями.

Для достижения указанной цели были определены следующие **задачи**:

- провести литературный обзор по теме исследования;
- ознакомиться с методами гидрохимического анализа, отбора проб воды и донных отложений, измерений эмиссии метана с последующим применением их в полевых исследованиях;
- проведение лабораторных анализов отобранных проб на содержание окрашенного растворенного органического вещества, изотопный состав вод и определение концентрации метана, содержание органического вещества в донных отложениях.
- провести сравнительный анализ потоков метана с зоны распространения сплошной и островной многолетней мерзлоты.

Объектами данной научно-исследовательской работы являются водные объекты Ямало-Ненецкого автономного округа и территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия).

Научная новизна работы:

1. Проведены измерения гидрохимических показателей ранее не исследуемых естественных водных объектов на территории Тункинского парка;
2. С помощью метода лазерной спектроскопии определен изотопный состав вод объектов Тункинского парка, Ямало-Ненецкого автономного округа, ранее не имеющих данных по выбранным водным объектам;
3. На основе корреляционного анализа установлены зависимости потока метана от измеряемых в работе параметров водных экосистем.

Практическая значимость. Произведен расчет потока метана с участка территорий сплошной и островной многолетней мерзлоты для проведения в дальнейшем оценки общего вклада в парниковый эффект.

Глава 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА И ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

Вышедший в 2022 году «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год» наглядно указывает на значительное увеличение роста температуры по всей России, в частности в Арктической зоне страны. Потепление зим за период 1994-2010 гг. наблюдалось в основном в арктической зоне России; на остальной территории зимние температуры убывали, слабо на Европейской части России (до -0.2 °C/10 лет) и значительно в Арктической части России (до -2 °C/10 лет на юге Сибири); после 2010 года наблюдались небольшие отклонения в сторону повышения температуры (Доклад об особенностях климата..., 2022).

В дополнение к температурным аномалиям в последнее время наблюдается глубинная дегазация в полярных регионах. Впервые на основе комплексной интерпретации данных дистанционного зондирования из космоса и разведочных исследований на полуострове Ямал в Арктике было выявлено 7 185 многолетних бугров пучения и 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на дне. Установлено, что на данном уровне изученности наибольшая плотность распространения опасных объектов приурочена к восточной части полуострова Ямал, а экстремальные зоны находятся на Сеяхинском, Северо-Тамбейском и Южно-Тамбейском участках исследований. В ряде кратерных озер доказана непрерывная и/или периодическая эмиссия газа, свидетельствующая о вулканическом генезисе извержений. Обоснована необходимость расширения регионов исследований и их детализации в районах жизнедеятельности человека и мониторинга процессов динамики криолитосферы и дегазации (Богоявленский, Сизов и др., 2019).

1.1 Географическое положение

Ямало-Ненецкий автономный округ. Ямало-Ненецкий автономный округ, входящий в состав Российской Федерации, расположен на северо-западе азиатской части России, в районе Полярного круга и территориально входит в состав Тюменской области. Северо-западная граница округа проходит с Ненецким автономным округом, западная – с Республикой Коми, южная – с Ханты-Мансийским автономным округом, восточная – с Красноярским краем, северная – с Карским морем. С юга на север округ простирается на 1150 км, с востока на запад – на 1130 км. Наиболее северная континентальная точка Ямала отдалена на 800 км от Северного полярного круга (Корчин и др., 2021).

Площадь 750,3 тыс. км². Население 511,24 тыс. чел. (2022; 534,1 тыс. человек в 2016; 486,2 тыс. чел. в 1989). Административный центр – г. Салехард. Административно-территориальное деление на 2022 год: 6 городских округов, 7 муниципальных округов (Самойлова, Чистякова, 2017).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. Национальный парк расположен в Тункинском районе Республики Бурятии (занимает весь административный район) на северных склонах хребтов Хамар-Дабан и Восточный Саян и в Тункинской котловине (Тункинский национальный парк, 2022).

Границы Тункинского парка полностью совпадают с границами района, площадью 11,8 тыс. км², занимающие западную часть Саяно-Прибайкальской Бурятии. На севере граничат по Тункинскими Гольцам с Окинским районом, на юге по Хангарульскому хребту и водоразделу западного Хамар-Дабана – с Закаменским районом республики. На западе и юго-западе по массиву Мунку-Сардык и юго-восточным отрогам Большого Саяна проходит государственная граница России и Монголии. На востоке район примыкает к Слюдянскому району Иркутской области (Тункинский национальный парк, 2022).

Северную половину района занимает Тункинская долина, являющаяся продолжением Байкальской впадины и уникальная своими целебными источниками и альпийскими лугами. Она простирается на 200 км в широтном направлении, постепенно поднимаясь до 1200 м над уровнем моря и сужаясь от 30 км до 20 км. По ложу долины течёт главная река района – Иркут. Южная часть района разделена рекой Зун-Мурэн на горно-таёжные отроги Хамар-Дабана на юго-востоке и отроги Большого Саяна с безлесными плато на западе (Тункинский национальный парк, 2022).

1.2 Геология

Ямало-Ненецкий автономный округ. Основанием Западно-Сибирской равнины является Западносибирская плита, граничащая на востоке с Сибирской платформой, на юге – с палеозойскими сооружениями каледонской складчатости в Центральном Казахстане, Алтае и Салаирско-Саянской области, на западе – со складчатой системой Урала (Западная Сибирь, 2000).

Западно-Сибирская плита в центральной части подстилается палеозойским фундаментом на глубине 3,0-3,5 км. Над ним находится толстый слой мезозойских и кайнозойских отложений. Особенности распространения, состава и формирования данных образований позволяют геологам выделять в этом комплексе три подкомплекса: нижне-, средне- и верхнеплитный. Обладая сходными чертами тектонического строения, они

достаточно четко различаются по фациальной природе и условиям образования слагающих их пород. В нижнем и верхнем подкомплексах преобладают континентальные, прибрежно- и мелководно-морские отложения, в среднем – морские (Западная Сибирь, 2000).

Центральная часть Западно-Сибирской плиты, особенно южная, представляла собой среду с преобладанием контрастного, местами высокогорного рельефа, что привело к формированию нижнего подкомплекса плиты. В осадках доминировали аллювиальные и озерно-болотные отложения. Принос терригенного материала шел не только с горного обрамления. Значительная часть его поставлялась внутренними выступами фундамента. Формирование среднеплитного подкомплекса протекало в обширном морском бассейне. Значительное место в разрезе приобрели биогенные, планктоногенные образования. Подкомплекс в верхней части плиты несет следы недавней тектонической активности, охватившей северный регион плиты в конце эоцена. В верхней части подкомплекса большое значение имеют угленосные континентальные отложения (Западная Сибирь, 2000).

Средняя толщина четвертичных отложений на севере Западной Сибири достигает 350-400 м. Отложения состоят из валунных суглинков, озерных ленточных глин, слоистых алевролитов и песков, с линзами погребенного торфа и богатыми ископаемыми слоями раковин двустворчатых моллюсков и фораминифер (Кузин, 1963).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. В основе тектонической структуры Тункинских гор лежит докембрийское ядро, окруженное древними байкальскими и каледонскими тектогенными структурами. В течение неогена и четвертичного периода новейшие тектонические движения вогнали бассейн, подняли горные хребты и приподняли горизонтальную плоскость. Геология Тункинских гольцов представлена гранитом, древней вулканической породой, мрамором и горнблендом, метаморфизованными в сланцы, гнейсы и кремнистые породы кристаллического строения (Тункинские гольцы в Бурятии, 2022).

Четвертичные отложения в горных впадинах и частях речных долин, маломощные слои продуктов выветривания горных пород, ледниковые и водно-ледниковые образования являются основными почвообразующими породами, сформировавшими современный почвенный покров в парке (Ишигенов и др., 2003).

1.3 Рельеф

Ямало-Ненецкий автономный округ. Западно-Сибирская равнина представляет собой сочетание низменностей и возвышенностей, высота над уровнем моря в районе достигает 250–285 м. Сибирские увалы разделяют ее на две котловины: северную (Нижнеобскую) и южную (Среднеобскую). Сибирские увалы представляют собой плоские возвышенности средней высотой в 160–180 м; в верховьях р. Пура увалы понижаются до 90–95 м. На востоке цепь возвышенностей (материков) достигает высот 170–190 м, а в отдельных местах превышает двухсот метров и образует Тазовско-Енисейский водораздел (Рельеф Севера Западной Сибири, 2015-2023).

Поверхность бассейнов Нижней и Средней Оби, за исключением восточных склонов Уральских гор, представляет собой низменную равнину, с незначительным падением на север. Обе котловины соединены между собой широким понижением, по которому протекает р. Обь. Самые низкие участки в бассейне Нижней Оби ограничены устьем реки Оби и южной частью Обской губы. Рельеф Нижней Оби состоит из плоских, заболоченных, многоозерных низменностей и дренированных долин с большими высотами и меньшей заболоченностью. С запада на восток, Северо-Сосьвинская возвышенность сменяется Нижнеобской низменностью, Полуйская возвышенность – Надымской низменностью, Ненецкая возвышенность – Пурской низменностью, Пур-Тазовская возвышенность – Тазовской низменностью, что указано на рисунке 1 (Физико-географическая характеристика..., 2017-2023).

Геоморфологическая структура территории характеризуется врезом активной эрозии, которая имела место в период дренирования территории в конце плейстоцена - начале голоцена, примерно 10 000 лет назад. Сегодня интенсивная эрозия отсутствует, она сменилась быстрым боковым расширением долин, характерным для просторов многолетней мерзлоты (Шполянская, 1981).

Территория исследования ограничена на севере Гыданской и Ямальской возвышенностями через Обскую губу, а на юге – возвышенностью Белогорского материка. Сибирский материк представляет собой хорошо дренированную возвышенность, для которой обычно характерны густые, высокие, темнохвойные леса, известные как урманы. Современные микроформы рельефа на рассматриваемой территории формируются мерзлотно-солифлюкционными процессами (бугры пучения и др.), в южной же части – карстово-суффозионными процессами (наличие множества мелких плоских понижений) (Шполянская, 1981).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. Территория парка является частью Саяно-Байкальского хребта, состоящей из горных хребтов и горных впадин. По высотным зонам вся территория парка делится на три гипсометрических уровня: высокогорные резко расчлененные гольцы с альпийским рельефом; среднегорные, реже низкогорные пространства – переходная зона между высокогорным рельефом и межгорными впадинами; межгорные впадины с комплексом аккумулятивных речных террас (Зиганшин, Попов, 2017).

Территория парка делится на: Тункинские гольцы, которые занимают северную часть парка; хребет Хамар-Дабан и его отроги, которые занимают южную, центральную и восточную части парка; и ряд горных котловин между ними (Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская и Мондинская). Рельеф местности сильно изрезан сетью рек и ручьев, между которыми расположены труднодоступные водоразделы со значительным количеством крутых склонов. Наибольшая высота над уровнем моря составляет 3 172 м, а наименьшая - 668 м. Тункинская долина, длиной 200 км и шириной 20-40 км, лежит между Тункинской впадиной на севере и хребтом Хамар-Дабан на юге (Биличенко, 2012; Зигагин, Попов, 2017).

Горы грядовые, пикообразные и массивные, с широкими, слабоволнистыми водоразделами, глубоко и густо расчлененные, в основном приуроченные к юго-западным склонам Хамар-Дабана. Абсолютные уровни поверхности изменяются от 1000-1100 м до 1800 м. Гравитационные процессы широко распространены на склонах гор и способствуют образованию осыпей. Хребет также представляет собой высокое крутосклонное денудационное плато с плоской поверхностью, которое глубоко вскрыто и

имеет признаки оледенения. Абсолютные высоты достигают более 1800-2300 м, а глубины разреза 800-1100 м (Зигашин, Попов, 2017).

Поверхность пролювиально-аллювиальных и аллювиальных равнин нередко заболочена и заторфована. Заболачиванию территории способствует плоский рельеф, близкое залегание к поверхности многолетнемерзлых грунтов, обилие атмосферных осадков. Имеются территории местного скопления озер. Наиболее значительны Койморские болота, поверхность которых изобилует термокарстовыми озерами (Ивахов, 2020).

1.4 Климатические условия

Ямало-Ненецкий автономный округ. Для округа характерна продолжительная зима (до восьми месяцев) и короткое лето, характеризующееся небольшим снежным покровом и сильными ветрами. Арктическая зона полуострова Ямал характеризуется продолжительной, холодной и суровой зимой, с сильными и частыми бурями, метелями и морозами, но с небольшим количеством осадков. В субарктическом поясе (южнее полуострова Ямал) климат резко континентальный, с летом продолжительностью до 68 дней и длительными периодами осадков в виде дождя. В северном (таежном) поясе Западно-Сибирской равнины климат также резко континентальный, но с более высокими средними температурами, более продолжительным летом (100 дней), более теплыми температурами и большим количеством осадков (Корчин и др., 2021).

Среднегодовая температура воздуха округа является отрицательной – около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (минимальная $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), но на пике лета температура может подняться до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Суровость климата также характеризуется резкими перепадами атмосферного давления, явлениями светового голодания, частыми и сильными ветрами до 40–60 м/с, магнитными бурями, нестандартным фотопериодизмом, дефицитом ультрафиолетового излучения (Никитин, Хаснулин, Гудков, 2015). Для территории Ямала как части азиатской зоны Российской Федерации характерны: зимой – полярная ночь с малым количеством солнечной радиации, а летом – «белые ночи» (Солонин, Бойко, 2017).

На рисунке 2 представлены годовые циклы среднегодовой температуры и общее количество осадков за 2022 г. в городе Салехард.

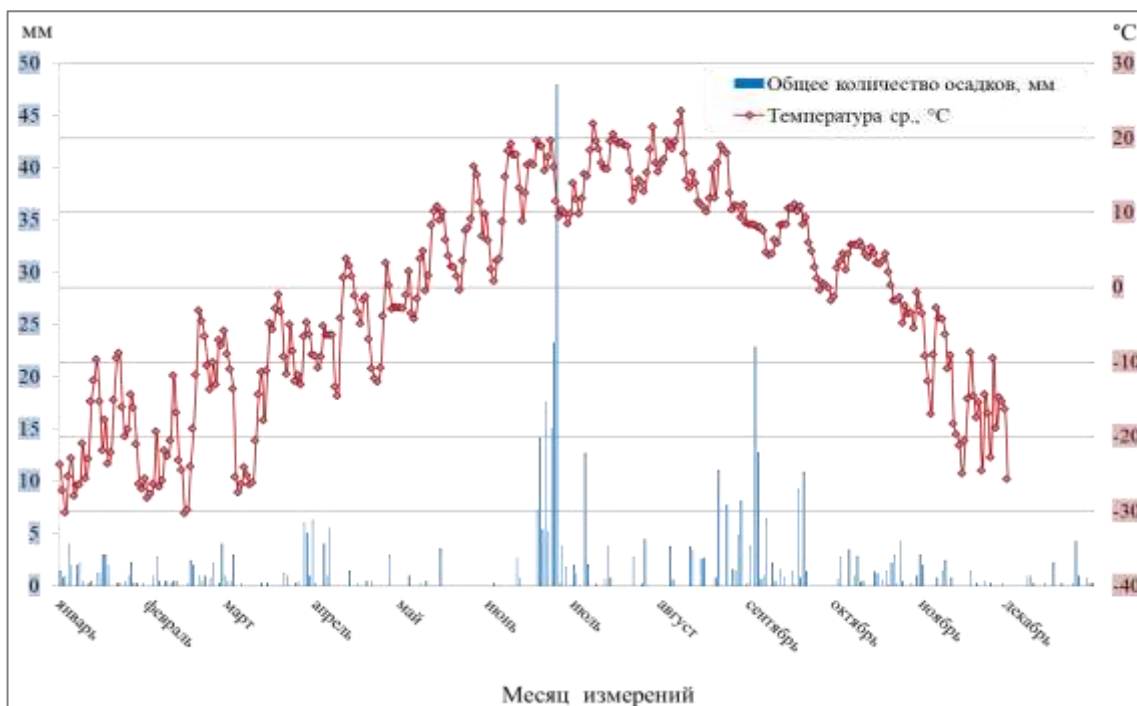


Рисунок 2 – Годовой цикл среднемесячной температуры и общее количество осадков в г. Салехард 2022 г. (<https://meteostat.net/ru/place/ru/salekhard?s=23330&t=2022-07-01/2022-07-31>)

Анализ синоптических условий 2022 г. показал, что в середине и конце января наблюдалось два пика повышения температуры. Резкие кратковременные скачки температур зафиксированы в феврале, марте, апреле, постепенный рост отмечается в июне, а максимум – в августе. Средняя температура в г. Салехард за 2022 года составляет $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пик приходится на 7 августа, температура воздуха – $+21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наименьшая температура 30 декабря – $-32,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максимальные атмосферные осадки отмечались с июня по июль (до 43 мм) и с августа по сентябрь (до 22,9 мм). Наименьшее количество осадков отмечается весной и в начале лета – марте, мае, июне (от 0 до 3,6 мм); также в конце осени и в начале зимы – ноябре, декабре (от 0 до 4,3 мм). Общее количество осадков за год составляет – 463,7 мм.

Ветровой режим территории носит муссонный характер: зимой ветер дует с охлажденного материка на океан, летом – с океана на сушу. В зимнее время преобладают ветры юго-западного направления, летом – северные и северо-западные. Повторяемость штилей за год составляет 10-15 %. Средняя годовая скорость ветра варьируется от 3,6 до 4,9 м/с (Самойлова, Чистякова, 2017).

Образование устойчивого снежного покрова происходит во второй половине октября – в первой половине ноября, разрушение во второй половине мая. Число дней со снежным покровом в среднем изменяется от 224 до 231. Распределение снега по поверхности неравномерное – от 0,2-0,5 м на плоских открытых участках и до 1,0-1,5 м на

лесных участках, в оврагах, логах. Среднее число дней с метелями достигает 44-59 (Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, 2004).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. Резко континентальный климат региона характеризуется большими суточными и годовыми колебаниями и малым количеством годовых осадков. В холодное время года регион находится под влиянием азиатского антициклона, ему соответствует солнечная, безветренная и безморозная погода. Зима с отрицательными средними суточными температурами начинается в середине ноября и длится около семи месяцев (Кароль, 1996; Василенко, Воропай, 2015).

На рисунке 3 представлены годовые циклы среднегодовой температуры и общее количество осадков за 2022 г. в селе Жемчуг (территория Тункинского парка).

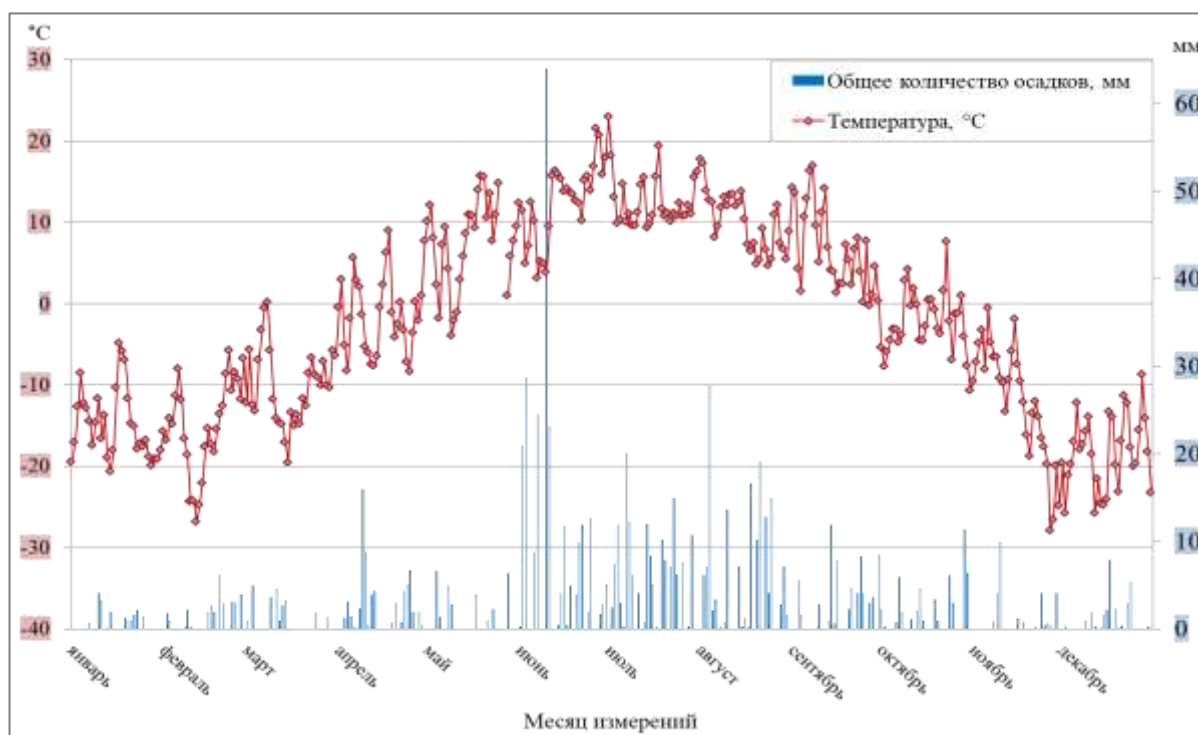


Рисунок 3 – Годовой цикл среднемесячной температуры и общее количество осадков в селе Жемчуг 2022 г. (<https://meteostat.net/ru/place/ru/zhemchug?s=30815&t=2022-08-01/2022-08-31>)

Анализ синоптических условий 2022 г. показал, что в конце января, в марте наблюдались резкие кратковременные скачки температур. Постепенный рост отмечается в период с апреля по май, а максимум – в июле. Средняя температура с. Жемчуг за 2022 год составляет -2,1 °C. Наибольшая температура воздуха в году приходится на 1 июля – +18,2 °C, наименьшая на 27 ноября – -28 °C.

Наибольшее количество осадков отмечалось в период с июня по сентябрь (до 64 мм). Наименьшее количество осадков отмечается с января по май (от 0 до 16 мм). Общее количество осадков за год составляет – 909 мм.

Распределение снежного покрова крайне неравномерно. На высоту и плотность снежного покрова значительное влияние оказывают пересеченность рельефа и перенос снега сильными западными и северо-западными ветрами. В долинах высота снежного покрова не превышает 0,5 м, ближе к границе леса она достигает 1–1,5 м. Снег рыхлый, на склонах северной экспозиции его больше, чем на южных склонах. Выше зоны леса под действием ветра снег уплотняется, образуя твердые заструги, наддувы (Белоусов, Будэ, Радзиминович, 2000).

Скорости основных ветров могут достигать 25-40 м/с, время наиболее сильных ветров – ноябрь. В летний период преобладают ветры западного и юго-западного направлений, в зимний – юго-западного и северного направлений (Кичигина, 2019).

1.5 Гидрология

Ямало-Ненецкий автономный округ. Водные объекты в районе представлены многочисленными озерами, реками и водно-болотными угодьями. Густота речной сети от начала трассы к ее концу изменяется от 0,39 до 0,32 км/км². Характерными чертами водотоков района являются: слабая врезанность, незначительные уклоны продольного профиля, высокая извилистость и медленное течение. По характеру водного режима реки относятся к типу рек с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года. Основное питание рек осуществляется водами снегового и дождевого происхождения. В снежном покрове сосредотачивается до 50 % запаса воды. Грунтовое питание вследствие наличия многолетней мерзлоты весьма незначительно (Физико-географические особенности..., 2015).

Значения мутности рек изменяются по территории от 15 до 24 г/л. По принятой в гидрохимии классификации по анионам речные воды относятся к классу гидрокарбонатных. По катионному составу поверхностные воды относятся преимущественно к кальциевым и натриевым водам (Намятов, 2011; Гарькуша, Фёдоров, Тамбиева, 2013; Логинова, Силаева, 2015).

Все 50 тысяч рек Ямала принадлежат бассейну Карского моря. Главные реки – Обь (с притоками Куноват, Полуй, Сыня, Войкар, Сось), Надым, Пур, Таз. Питание рек снеговое, частично дождевое. Продолжительная зимняя межень сменяется высоким половодьем. Ледостав длится 7–8 месяцев. Весной характерны заторы в низовьях. Все реки имеют широкие поймы, меандрирующие русла, протоки и рукава. В округе – 300 тысяч озёр (термокарстовые, пойменные, торфяные, прибрежно-лагунные, ледниковые и пр.), наиболее крупные из них – Шурышкарский Сор, Нейто, Ярато. Значительные площади заняты болотами (Самойлова, Чистякова и др., 2017).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. Два крупных речных бассейна, Утулик и Иркут, расположены на территории Тункинского национального парка. Эти бассейны занимают 7 % и 93 % от общей площади парка соответственно. Река Утулик относится к горным рекам. Ее бассейн вместе с 31 притоком первого, второго и третьего порядка является частью бассейна озера Байкал (Национальный парк «Тункинский», 1991-2023).

Основная гидрологическая сеть национального парка представлена водосбором реки Иркут. Река является основным водотоком национального парка. Она берет начало из озера Ильчир в районе Ока, на высоте 1 963 м над уровнем моря. Длина реки Иркут составляет 500 км, а общая площадь водосбора - 15 020 км². Далее она впадает в реку Ангара около города Иркутск. Река Иркут проходит по территории парка в среднем течении, где ее длина составляет 247 км. Река Иркут относится к горным рекам. Эта река, как и другие ее притоки, питается за счет таяния горного снега и дождевых осадков (Национальный парк «Тункинский», 1991-2023).

Глубина залегания грунтовых вод в зависимости от структуры подстилающих пород. Водопроницаемых почв мало. Как правило, водопроницаемость приурочена к трещиноватым и кристаллическим подстилающим породам. Подземные целебные минеральные воды, на базе которых организованы курортный комплекс «Аршан» и водолечебница «Нилова Пустынь», залегают на глубине 150–200 метров. Как водные пути транспорта вся гидрографическая сеть на территории национального парка значения не имеет: она порожиста, мелка, имеет много перекатов и быстрое течение (Зиганшин, 2009).

В национальном парке есть несколько небольших озер, образовавшихся в основном во время ледникового периода. Болота в национальном парке занимают 62 км², что соответствует 0,6 % площади парка. Часть болот (38 км²) относится к низинному и переходному типу. Болота распространены на водопадах и склоновых вершинах гор выше 1 000 м. Болота в основном связаны с летним оттаиванием почвы (Зиганшин, 2009).

1.6 Почвенный покров

Ямало-Ненецкий автономный округ. В общем зональном распределении типов почв расположение внутри зоны тесно связано с микрорельефом и степенью дренирования местности. На крайнем севере полуостровов Ямал, Гыданский и на островах распространена арктическая тундра с арктотундровыми почвами. В арктической зоне широко развиты полигональные пятнистые тундры (Самойлова, Чистякова, 2017).

В типичной тундре, к югу от 70° с. ш., развиты торфянисто-поверхностноглеевые суглинистые почвы. Подзолистые почвы встречаются только на песках, в наиболее сухих

местах. На морских террасах в понижениях формируются злаково-осоковые приморские луга на маршевых почвах. Южнее, приблизительно между 66° и 68° с. ш., в лесотундровой зоне почвы – переходные от торфяно-глеевых к подзолисто-глеевым (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1972).

В центральных частях полуострова распространены кустарничково-мохово-лишайниковые (типичные) тундры на тундрово-глеевых почвах в сочетании с осоково-пушицевыми низинными болотами на торфяно-глеевых и болотно-мерзлотных почвах (Самойлова, Чистякова, 2017).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. В Тункинской долине основной фон составляют дерново-подзолистые и серые метаморфические почвы, на которых произрастают темнохвойные и сосновые леса. Широкое распространение имеют мелколиственные и смешанные леса на серых почвах. Основными почвами в высокогорье являются – петроземы и литоземы (грубогумусовые). В горно-таежной зоне котловины на южных склонах формируются серые почвы, а на северных – подбуры грубогумусированные и дерново-подзолистые почвы. На северных склонах в относительно пониженных элементах рельефа формируются (торфяно-) криоземы и торфяно-подбуры глеевые, в которых наблюдаются процессы криотурбации и оглеения. В степных ландшафтах основной фонд высоко значимых земельных ресурсов составляют черноземы (гидрометамор-физованные) и темногумусовые почвы (Белозерцева, Черкашина, 2013).

В условиях сильного заболачивания формируются ландшафты среднего и нижнего течения р. Тунки на аллювиальных темногумусовых глееватых, перегнойно-гидрометаморфических, перегнойно-глеевых и торфяно-(минерально)-глеевых почвах. Эта территория подвержена погружению и характеризуется преобладанием озерно-болотных природных комплексов. В поймах верхнего течения рек распространены слаборазвитые аллювиальные слоистые и серогумусовые почвы. Ландшафты заболоченных лесов на торфяно-криоземах глееватых и дерново-подзолисто-глеевых почвах наблюдаются в бассейне р. Енгарги (Белозерцева, Черкашина, 2013).

1.7 Растительный мир

Ямало-Ненецкий автономный округ. На полигонах между пятнами песчаного грунта травяно-кустарничково-мохово-лишайниковые полигональные тундры занимают до 70 % от общего проективного покрытия (ОПП). Среди сосудистых растений высотой 5–10 см (проективное покрытие по ярусам (ПП) = 20–50 %) наиболее обильны *Ledum decumbens* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum subholarcticum* V. и *Carex arctisibirica* C.

Лишайниковый покров (ПП = 50–70 %) формируют *Sphaerophorus globosus* V., *Bryocaulon divergens* K. Мхи *Polytrichum hyperboreum* R. и *Racomitrium lanuginosum* B. произрастают пятнами (ПП = 10–20 %). В ложбинках между полигонами – травяно-кустарничково-моховая растительность (Андреяшкина, 2013).

Травяно-кустарничковые тундры обычны на солифлюкционных песчано-супесчаных склонах. ОПП = 40–80 %. Доминируют *Salix polaris* W. и *Salix arctica* P., заметны *Calamagrostis lapponica* C., *Bistorta vivipara* L., *Equisetum arvense* L. Мхи и лишайники не формируют дернины (Андреяшкина, 2013).

До 20 % площади занято супесчаными пятнами, где преобладают травяно-кустарничково-лишайниково-моховые тундры. Травяно-кустарничковый ярус (ПП = 30–80 %, высота 10–15 см) формируют *Salix nummularia* V., *Empetrum subholarcticum* V., *Carex arctisibirica* C., *Calamagrostis lapponica* C., *Poa arctica* R., *Bistorta vivipara* L.. В моховом покрове (ПП = 50–80 %) содоминируют *Hylocomium splendens* B. и *Aulacomnium turgidum* S. ПП лишайников: преобладают *Sphaerophorus globosus* V., *Ochrolechia frigida* L., *Peltigera aphthosa* W., *Cladonia coccifera* W. – 10–40 % (Андреяшкина, 2013).

Исходно богатый лишайниковый покров (ерниковые травяно-кустарничково-моховые тундры) выбит – ПП = 5 %. Ерник сомкнутостью 0,3–0,7 и высотой 25 см. Травяно-кустарничковый ярус (ПП = 20–30 %) слагают *Vaccinium vitis-idaea* L., *Ledum decumbens* L., *Carex arctisibirica* J. В моховой дернине (ПП = 50–80 %) содоминируют *Aulacomnium turgidum* W. и *Pleurozium schreberi* M. (Андреяшкина, 2013).

Общее проективное покрытие около 100 % занимают ивово-ерниковые кустарничково-травяно-моховые тундры. Ерник и ива *Salix glauca* L. образуют ярус сомкнутостью 0,7 и высотой 20 см. В травяно-кустарничковом ярусе (ПП = 30 %) на супесчаных породах чаще встречаются *Vaccinium vitis-idaea* L., *Calamagrostis lapponica* C., *Carex arctisibirica* C., *Carex concolor* R., *Carex rariflora* S. Последние три вида, а также пушицы *Eriophorum vaginatum* и *E. polystachion* L. преобладают на суглинках. В почти сплошной моховой дернине обильны *Aulacomnium palustre*, *A. turgidum*, *Hylocomium splendens*, *Oncophorus wahlenbergii* Brid., *Sanionia uncinata* и сфагны. Лишайники редки (Андреяшкина, 2013).

Ивняки травяно-моховые – заросли *Salix lanata* L. и *S. glauca* высотой до 1 м и сомкнутостью 0,8, приуроченные к супесчано-суглинистым породам. В травостое (ПП = 80 %) обильны *Calamagrostis lapponica* C., *Bistorta vivipara* L., *Rubus arcticus* L., *Petasites frigidus* F., *Eriophorum polystachion* L., *Equisetum arvense* L.. В тонком моховом покрове (ПП = 70 %) – *Sanionia uncinata* H., *Aulacomnium palustre* F. Лишайники редки (Андреяшкина, 2013).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. По ботанико-географическому районированию растительные сообщества парка принадлежат к Саяно-южнобайкальским формациям. Растительность представлена горно-тундровыми, горно-луговыми, горно-таежными и таежными в сочетании с горностепными сообществами.

Основной лесообразующей породой является кедр (*Pinus sibirica* T.). Кедровые леса занимают 51,9 % от площади лесов. Кедровники поднимаются до верхней границы леса, выше в субальпийском поясе встречаются сообщества кедрового стланика (*Pinus pumila* P.). 25,8 % лесной площади приходится на долю лиственничников (*Larix sibirica* L.), сосновые насаждения составляют 8,1 % (*Pinus sylvestris* L.), еловые (*Picea obovata* L.) - около 1 %, незначительные площади занимает пихта (*Abies sibirica* L.) (ООПТ России, 2022).

Из мелколиственных лесов (10,3 %) наиболее распространены березняки (*Betula platyphylla* S.) - 8,5 % и осинники (*Populus tremula* L.) - 1,6 %. Незначительные площади занимают сообщества из тополя (*Populus suaveolens* F.) и ивы (*Salix miyabeana* S., *Salix viminalis* L.). Чаще всего встречаются леса с багульником (*Ledum palustre* L.), занимающие 31,8 % покрытых лесом земель. Сравнительно большие площади занимают лесные сообщества с брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – 22 %, с рододендром (*Rhododendron dahuricum* L.), а также злаково-разнотравные (18,2 %), горно-каменистые (10 %) группы типов леса. В парке произрастает 51 вид, включенный в Красную книгу Республики Бурятия, в Красную книгу России включен 21 вид, среди них: мертензия сибирская (*Mertensia sibirica* P.), мегадения Бардунова (*Megadenia Bardunovii* M.), родиола розовая (*Rhodiola rosea* L.), башмачок крупноцветковый (*Cypripedium macranthos* S.), рододендрон Адамса (*Rhododendron adamsii* R.), ель сибирская голубая (*Picea sibirica* var. *coerulea* M.) и другие (ООПТ России, 2022).

1.8 Многолетняя мерзлота

Ямало-Ненецкий автономный округ. Основная пространственная закономерность распространения многолетней мерзлоты в Западной Сибири проявляется в ее зональном характере. В регионе в направлении с севера на юг температура мерзлых пород постепенно повышается, а мощность уменьшается (Шполянская, 1981).

Мощность мерзлоты уменьшается с севера на юг от 250-400 м в зоне тундры до 50-100 м у южной ее границы (в зоне тайги). Региональной особенностью Западной Сибири является существование на ее территории глубоко залегающего слоя реликтовой многолетней мерзлоты. Этот слой обнаруживается к югу от Полярного

круга и прослеживается вплоть до 60° с. ш. При этом, от широты Полярного круга до широты 61-62° с. ш. он образует второй (нижний) слой многолетней мерзлоты, залегающей на глубинах от 100-150 м (кровля слоя) до 300-350 м (подошва слоя). К югу от широты 61-62° с. ш., где современная мерзлота отсутствует (за исключением аномальных условий), этот слой существует в виде изолированного глубоко, залегающего слоя мерзлоты с температурой близкой к 0 °С. Слой залегаёт на глубинах от 150-200 м (кровля слоя) до 300-400 м (подошва слоя) (Шполянская, 1981).

Республика Бурятия. Тункинский национальный парк. В районе Тункинской долины можно выделить как островную, так и сплошную многолетнюю мерзлоту. Мерзлота охватывает отложения лишь в ее центральных частях, а ближе к краям исчезает, особенно у хребта Тункинские Гольцы, именно здесь на поверхность выходят горячие подземные источники. Особенностью мерзлотного покрова в котловине является то, что он не создает единую толщу, а имеет двуслойный вид. Нижний слой сплошной, местами перемежается тальми породами. От верхнего он отделен тальми породами мощностью от 40 м до 50 м. Верхний слой перемежается таликами и залегаёт до глубины в 30-40 метров. Этот слой находится большей частью под болотами, поймами рек и низкими речными террасами. Местами оба слоя мерзлоты сливаются, в мерзлых породах встречаются довольно крупные линзы льда (Аутов, 1995).

В пределах озерно-аллювиальной равнины совместно с тектоническим опусканием сокращение верхнего слоя мерзлоты приводит к еще большему заболачиванию и к провалам, вследствие чего образуются озера. Температура на верхней границе мерзлых пород составляет -0,2 °С, а на глубине 10 м и глубже – до -2 °С. В зависимости от процентного содержания в отложениях глинистого и песчаного материала существует разница в мощности сезонного промерзания грунтов, которая в среднем не превышает 1,5 м (Лапердин, Кустов, Качура, 2010).

1.9 Деятельность человека и его воздействие на территорию

Ямало-Ненецкий автономный округ. Ямало-Ненецкий автономный округ входит в Западно-Сибирский экономический район, является ресурсным регионом Российской Федерации. По запасам и объемам добычи природного газа округ занимает первое место в Российской Федерации, а по разведанным запасам жидких углеводородов (нефти и конденсата), второе место после Ханты-Мансийского автономного округа. Суммарно в округе разрабатывается 93 месторождения из 234. Основные разрабатываемые месторождения: Заполярное, Уренгойское, Бованенковское, Ямбургское, Южно-Русское, Береговое, Юрхаровское (все нефтегазоконденсатные), Еты-Пуровское, Находкинское (нефтегазо-

вые), Медвежье (газовое) (Состояние и перспективы использования..., 2021).

Переработка углеводородного сырья (основная продукция – сырьё для нефтехимической и химической промышленности, в т. ч. широкая фракция лёгких углеводородов) осуществляется на газоперерабатывающих заводах компании «СибурТюменьГаз»: Губкинском (г. Губкинский), Вынгапуровском и Муравленковском (в Пуровском районе), Пуровском заводе по переработке газового конденсата компании НОВАТЭК (г. Тарко-Сале). Действует Новоуренгойский завод компании «Газпром» по подготовке газового конденсата к транспортировке (Состояние и перспективы использования..., 2021).

Добычей полезных ископаемых и строительного сырья занимаются около 100 предприятий (включая суборганизацию ОАО "Газпром"). Особенностью пищевой промышленности является производство рыбы (компания "Ямал продукт" в г. Салехард) и мяса (компания "Ямальские олени" в селе Яр-Сале). Основные промышленные центры находятся в городах: Новый Уренгой, Ноябрьск и Губкинский (Состояние и перспективы использования..., 2021).

Агропромышленный комплекс Ямало-Ненецкого автономного округа является одной из составляющих экономики региона и основным источником жизнеобеспечения коренного населения. В силу естественных климатических условий сельское хозяйство автономного округа ориентировано в первую очередь на традиционные для автономного округа отрасли – оленеводство, рыболовство, звероводство, переработка мяса, рыбы и пушно-мехового сырья. Выращиваются картофель и овощи (Самойлова, Чистякова, 2017).

Округ располагает высоким туристско-рекреационным потенциалом: здесь проживает ряд коренных малочисленных народов Севера, сохранивших традиционные виды хозяйственной деятельности (главным образом в Ямальском и Приуральском районах, близ Салехарда – природно-этнографический комплекс «Ямальская вотчина князя Тайшина»), проводятся национальные праздники (в т. ч. День оленевода); разработаны туристические маршруты (в т. ч. «По следам мамонтов» в Ямальском районе; сплав по горным рекам Полярного Урала, восхождения на горные вершины Харпско-Раийзской зоны в Приуральском районе), на территории округа – ряд особо охраняемых природных территорий, в т. ч. федерального значения (Самойлова, Чистякова, 2017).

Республика Бурятия. Основными источниками антропогенного воздействия в Тункинском национальном парке являются следующие:

1. Нерегулируемый выпас крупного рогатого скота;
2. Рекреационная нагрузка;
3. Автомобильные дороги, выхлопы от транспорта;
4. Использование древесины для отопления;

5. Лесные пожары;

6. Перенос воздушных масс с заводов, находящихся в Иркутской области. Таких как: Байкальский завод металлоконструкций, Иркутсккабель, Шелеховский асфальтобетонный завод, Гранит, БайкалПласт.

Рекреационный потенциал Тункинского парка складывается из (Биличенко, 2012):

– экскурсионно-познавательного туризма (включая научный, мемориальный);

– спортивного пешего, водного, горного (разных категорий сложности) туризма;

– спортивно-промысловой деятельности (охота, рыбная ловля);

– лечебно-оздоровительного отдыха: на территории парка находится более двухсот минеральных источников (углекислые воды курорта Аршан, железистые источники Хонгор-Уулы, метановые термы Жемчугских минеральных источников, кремнистые радоновые термы Ниловой Пустыни, углекислые радоновые термы Шумака). Здесь функционирует два санаторно-оздоровительных комплекса (курорт "Аршан" и лечебница "Нилова Пустынь"), а также свыше 70-ти ведомственных баз отдыха и пансионатов (в основном промышленных предприятий Иркутской области);

– массового отдыха (пикникового, пляжно-купального, летнего и зимнего спортивно-оздоровительного);

– прогулочно-промыслового отдыха (сбор лекарственных трав, грибов, ягод, орехов);

– религиозного (наличие дацанов, церквей, культовых и священных мест).

Негативные природно-антропогенные воздействия на лесные ресурсы оказываются, ветровалами, лавинами, селями, наводнениями, овражной и береговой эрозией, заболачиванием, вредителями и болезнями леса (Атутова, Макаров, 2017).

Лесные пожары. Широкомасштабное негативное влияние на состояние леса оказывают крупные пожары. Природно-антропогенные условия возгорания сформировались в лесах района за последние десятилетия. Они возникли в результате накопления большого объема растительного горючего материала. Особое место, как потенциальный очаг крупных пожаров, занимают остаток несанкционированных рубок, ветровальный и сухой материал гарей (Состояние лесов..., 2003).

Самые ближайшие производственные предприятия, которые могут оказывать негативное воздействие на Тункинскую долину, находятся в Иркутской области. Это предприятия 2 класса опасности: Байкальский завод металлоконструкций, Иркутсккабель, Шелеховский асфальтобетонный завод, Гранит, БайкалПласт (Санеев, Майсюк, 2018).

Согласно розе ветров Аршана от Иркутска могут лететь загрязняющие вещества (с востока и северо-востока на запад и северо-запад), но расстояние между Тункинской

долиной (п. Аршан) и Иркутском 212 км. Воздушные массы, двигаясь с востока на запад, рассеиваются в пределах 20 км. Так же защитой от загрязняющих веществ является хребет Тункинские Гольцы, который не позволяет двигаться загрязняющим веществам дальше. А значит, что здесь не оказывается негативное воздействие от производственных предприятий (Тункинская долина..., 2005).

Основными источниками антропогенного воздействия в Тункинском парке являются неконтролируемый выпас крупного рогатого скота местным населением и большие потоки туристов на территории отдельных курортных поселках, которые оказывают значительное влияние на вытаптывание земель и загрязнение территории бытовыми отходами (Биличенко, 2012).

Глава 2. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Парниковые газы являются основной причиной парникового эффекта, который приводит к росту температуры на планете. Одним из основных парниковых газов является метан. Хотя его содержание в атмосфере невелико, он обладает потенциалом глобального потепления в 72 раза большим, чем CO_2 , и даже небольшие изменения его концентрации в атмосфере могут привести к усилению парникового эффекта. Атмосферный метан является климатообразующим фактором, который влияет на температуру атмосферы. Его вклад в глобальный цикл $\sim 17\%$ или $0,51 \text{ Вт/м}^2$ (Ивахов, Параманова, Привалов и др., 2020).

По данным межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC-2007), глобальный поток метана в атмосферу составляет около 600 Мт/год. Указано, что на долю источников, связанных с различными природными механизмами эмиссии метана, приходится не более 200 Мт/год, при этом вклад океана и газогидратов не учитывается при расчетах. На гидросферу приходится около 20-25 Мт/год CH_4 , а на шельф морей в арктической зоне по оценкам IPCC-2007 приходятся незначительная доля эмиссии метана (10-20 Мт/год) (Адушкин, Кудрявцев, 2018).

Особый интерес представляет теория о том, что повышение температуры моря могло привести к высвобождению большого количества метана со дна арктического моря. В районах, где многолетняя мерзлота деградировала на небольшой глубине, произошло высвобождение метана, предположительно из газовых гидратов. Так поток метана в шельфовой зоне Российской Арктики оценивается в 90 Тг/год, с озер Сибири и Аляски $24,2 \pm 10,5$ Тг/год, озер Швеции и Канады 8-48 Тг/год (Адушкин, Кудрявцев, 2018).

В другом литературном источнике глобальный вклад эмиссии метана оценивается в 582 ± 87 Тг в год. Где поток природными и антропогенными ископаемыми источниками составляет 175 ± 39 Тг CH_4 /год, причем антропогенная составляющая, связанная с добычей и потреблением ископаемого топлива, оценивается на уровне 90-100 Тг/год (Гарькуша, Федоров, 2019).

По современным оценкам потоки метана наземными и подводными геологическими источниками варьируют в диапазоне от 40 до 64 Тг/год, при этом на эмиссию метана грязевыми вулканами приходится от 6 до 9 Тг/год, на микропросачивания, обусловленные диффузной эмиссией, – от 10 до 25 Тг/год, на геотермальные источники – от 2.5 до 6.3 Тг/год, на подводные сипы – примерно 20 Тг/год и магматические вулканы – меньше чем 1 Тг CH_4 /год (Гарькуша, Федоров, 2019).

В таблице 1 представлена оценка Неправительственного экологического фонда

имени В.И. Вернадского вклада эмиссии метана от антропогенных источников выбросов метана в Мт CH₄/год.

Таблица 1

Выбросы метана от антропогенных источников, Мт(CH₄) за 1990 и 2005 годы и прогнозируемые выбросы на 2030 год (сценарий «Business as Usual») (<https://clck.ru/34CR3z>)

| Категории источников/год | 1990 | 2005 | 2030 |
|---|----------------------|-------|-------|
| | Мт(CH ₄) | | |
| <i>Энергетика</i> , всего в том числе: | 105,1 | 118,4 | 166,2 |
| Добыча и переработка нефти и газа | 60,9 | 73,5 | 100,6 |
| Добыча угля | 25,2 | 24,8 | 37,3 |
| Сжигание ископаемого топлива | 10,5 | 10,7 | 17,3 |
| Сжигание биомассы | 8,4 | 9,4 | 11,0 |
| <i>Промышленные процессы (не плотности оборудования)</i> | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| <i>Сельское хозяйство</i> , всего в том числе: | 142,1 | 144,5 | 166,9 |
| Жвачные животные | 84,0 | 90,2 | 110,5 |
| Рисоводство | 22,9 | 23,9 | 24,3 |
| Обращение с навозом | 11,1 | 10,4 | 12,0 |
| Сжигание травы в саванне, выбросы от пашни сельскохозяйственных остатков, | 24,1 | 20,0 | 20,0 |
| <i>Отходы</i> , всего в том числе: | 51,0 | 61,2 | 75,4 |
| Захоронение твердых отходов | 33,6 | 37,8 | 45,7 |
| Обращение с навозом | 11,1 | 10,4 | 12,0 |
| Обращение со стоками | 16,8 | 22,7 | 29,0 |
| другие способы обработки отходов | 0,6 | 0,7 | 0,7 |
| Итого: | 298,5 | 324,6 | 408,8 |

Из таблицы стоит отметить, что наиболее значительными составляющими антропогенной эмиссии метана являются домашние животные – до 30 % антропогенных выбросов, а также добыча и переработка нефти и газа – около 23 %. Ежегодно от антропогенных источников в атмосферу попадает по оценкам от 319 до 352 Мт CH₄ (данные 2000-2012 гг.). Из естественных источников в атмосферу попадает по оценкам от 218 до 384 Мт CH₄. Среди них наиболее интенсивен поток CH₄ с поверхности заболоченных территорий, составляющий до 80 % (Роль метана в изменении климата, 2018).

В таблице 2 представлены методические данные по измерению потоков метана, расположенные вблизи территорий исследований (ЯНАО, Тункинский парк). По литературным источникам стоит отметить, что суммарный поток эмиссии метана на

территории распространения многолетней и островной мерзлоты оценивается от 2,42 до 8000 Мт $\text{CH}_4/\text{год}$, такой колоссальный разброс связан с разными методиками расчетов, с местом измерения потока, годом исследования.

По работам 2012-2016 гг. (таблица 2) наибольшее изменение потока метана на территориях распространения сплошной мерзлоты отмечается в весенний период по сравнению с осенним – величина варьируется от 1,79-4,58 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2*\text{ч})$. Данная особенность обусловлена с накоплением в зимний период под толщей льда различных газов, в частности метана.

На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (2018 г.) величина эмиссии метана может достигать 6,06 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2*\text{ч})$. Также в работе Л.Л. Голубятникова и Е.А. Зарова (2018) на торфяных возвышениях отмечено отрицательное значение эмиссии метана (таблица 2). Отрицательные значения потоков указывают на поглощение экосистемами атмосферного метана.

Исследований по измерению потока метана с поверхности водных объектов на территории Республики Бурятия отсутствует. По литературным источникам (таблица 2) величина эмиссии метана в соседней Иркутской области (Байкал и территория близ озера) варьируется от 0,1–13,9 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2*\text{ч})$.

Таблица 2

Метаданные по измерениям потоков метана

| Регион/ район | Год | Период | Источники метана | | Поток CH ₄ | | Источник |
|--------------------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|---|--|---|--------------------------------------|
| | | | | | мг CH ₄ /(м ² ч) | Суммарный поток метана, Мт CH ₄ /год | |
| Томская область (50–70° с.ш.) | 2012- 2014 | в вегетацион ный период | Болотный массив «Бакчарский» | | | 2,42 до 11,19 | Веретенникова, Дюкарев, 2019 |
| | | | | открытая осоко-сфагновая топь | 2,66 ± 4,58 | | |
| | | | | сосново-кустраничково- сфагновое болото | 0,57 ± 0,69 | | |
| Республика Коми | 2014- 2015 | конец мая | Интинский район | | | 4–8*10 ⁴ | Мигловец, Лукашева, 2016 |
| | | | | торфяной бугор | 1,79-3,24 | | |
| | | конец июля –начало августа | | торфяные пятна мерзлотного сухоторфяного бугра | 0,25-0,36 | | |
| Ханты-Мансийский автономный округ | 2016 | октябрь– май | Болотный полигон «Мухрино» | | 0,06 ± 0,01 | | Смагин, Шнырев, Садовникова, 2016 |
| Ямало-Ненецкий автономный округ | 2018 | | экосистемы южной тундры | | | | Голубятников, Заров, 2018 |
| | | | | торфяные возвышения | -0,13–0,14 | | |

Продолжение таблицы 2

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|--------|---|--|-----------------|--|--|
| | | | | мочажины в болотных ландшафтах | 1,20–6,06 | | |
| | | | | внутриболотные озёрки | 0,34–3,47 | | Голубятников, Заров, 2018 |
| | | | | тундровые озера | 0,02–18,25 | | |
| Ямало-Ненецкий автономный округ | 2019 | август | озеро LK008 (70,2754°с. ш., 68,8112°в. д.) в центральной части полуострова Ямал | | | | Kazantsev, Krivenok1, Dvornikov, 2019 |
| | | | | зона просачивания/ сип №1 | 1,19 | | |
| | | | | зона просачивания/ сип №2 | 0,87 | | |
| озеро Байкал | 2014–2015 | | озеро Байкал | | | | Гарькуша, Фёдоров, Тамбиева, Андреев, Михайленко, 2019 |
| | | | | концентрация CH ₄ в воде | 0,1-13,9 | | |
| | | | | концентрация CH ₄ в донных отложениях | 0,03-3,69 мкг/г | | |
| | | | Северный район оз. Байкал | | | | |
| | | | ст. 412, 0,5 км от устья р. Кичера, 55°46'00.18" с.ш. 109°37'03.40" в.д. | CH ₄ в воде | 0,4–1,5 | | |

Продолжение таблицы 2

| | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---------------|--|-------------------------------------|--------------------|--|--|--|--|--|
| | | | | CH ₄ в донных отложениях | 0,97–1,81 мкг/г | | | | | |
| озеро Байкал | 2014– 2015 | | ст. 410, 1.0 км от устья р. Чуна, 55°42'20.40" с.ш. 109°29'23.40" в.д. | CH ₄ в воде | 0,2–1,8 | | Гарькуша, Фёдоров, Тамбиева, Андреев, Михайленко, 2019 | | | |
| | | | | CH ₄ в донных отложениях | 0,90 мкг/г | | | | | |
| | | | Район впадения р. Селенги в оз. Байкал | | | | | | | |
| | | | ст. 3-3, 52°13'08.28" с.ш. 106°06'37.50" в.д. | CH ₄ в воде | 0,2 | | | | | |
| | | | | CH ₄ в донных отложениях | 0,48–0,57 мкг/г | | | | | |
| | | | ст. 10-2, 52°24'02.40" с.ш. 106°14'53.30" в.д. | CH ₄ в воде | 2,5–4,5 | | | | | |
| | | | | CH ₄ в донных отложениях | 0,03–0,04 мкг/г | | | | | |
| | | | Южный район оз. Байкал, зона влияния БЦБК | | | | | | | |
| | | | ст. 412, 0.5 км от устья р. Кичера, 55°46'00.18" с.ш. 109°37'03.40" в.д. | CH ₄ в воде | 0,3 | | | | | |
| | | | | CH ₄ в донных отложениях | 1,24 мкг/г | | | | | |
| Южный район оз. Байкал, фоновые участки | | | | | | | | | | |
| ст. 106, 51°37'49.01" с.ш. 103°56'29.20" в.д. | CH ₄ в воде | 2,1 | | | | | | | | |
| | CH ₄ в донных отложениях | 0,03 мкг/г | | | | | | | | |

Глава 3. РОЛЬ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМАХ

Изменение климата за последнее десятилетие, вероятно, окажет особое влияние на полярные экосистемы, которые наиболее уязвимы к внешнему воздействию. В Арктике наблюдаемое потепление привело к значительному сокращению площади и толщины летнего льда и уменьшению количества многолетнего морского льда (Smedsrud et al., 2008; Снакин, 2019; Фалеев, Цыбиков, Сидорович, 2022), что отразилось на состоянии и продуктивности арктических экосистем, в том числе и арктических морей России (Hansen et al., 2003; Arrigo et al., 2008). Таким образом, увеличение площади и продолжительности цветения фитопланктона, наблюдаемое в Арктике в последние годы, привело к росту первичной продукции.

Пространственная и временная изменчивость растворенного и взвешенного органического вещества, его элементный и биохимический состав могут быть изучены для определения, с одной стороны, запасов энергии для развития гетеротрофных организмов и, с другой стороны, изменений, которые претерпевает органическое вещество при его использовании в экосистеме или при климатических или антропогенных воздействиях на экосистему (Лапина, Торгунова, Агатова, 2014).

3.1 Роль растворенного кислорода в воде

Биогеохимический круговорот кислорода необходим для жизнеспособности водных экосистем. Окислительно-восстановительные процессы с участием растворенного кислорода протекают с образованием промежуточных активных веществ. Наиболее важным компонентом окисления в природных водах является растворенный кислород. Высокая реакционная способность кислорода определяется не его молекулярной формой, а промежуточными активными веществами биогеохимического цикла (Дубас и др., 2018).

Определение содержания продуктов активации кислорода в природной воде было проведено советскими и американскими исследователями в начале 1980-х годов. Учитывая, что перекись водорода (H_2O_2), гидроксильные радикалы (OH^\bullet), супероксид (O^\bullet), алкилпероксидных (RO_2) компонентов абиотической составляющей, значения их стационарных концентраций позволяют оценить вклад свободно-радикальных процессов в самоочищение природной водной среды. Пероксид водорода может быть окислителем, но его окислительная способность невелика. Под воздействием ультрафиолетового излучения H_2O_2 распадается с образованием свободных форм кислорода: $2H_2O_2 + 2h\nu \rightarrow 2OH^\bullet + H_2O_2$ (Логинова, 2015).

В полярных водах, принадлежащих к системе циркуляции открытого океана, насыщение кислородом никогда не опускается ниже 80 %. В бореальных водах отрицательный кислородный бюджет, обусловленный гистерезисом насыщения кислородом во время конвекции, является основной частью кислородных минимумов. При увеличении концентрации питательных веществ в водоеме образуется новое органическое вещество, и кислород выделяется в водную среду. Так, годовое содержание органического вещества в олиготрофных водоемах колеблется в пределах 0,04-0,2 мгО₂/л, в мезотрофных – 0,1-0,3 мгО₂/л, а в эвтрофных – до 2 мгО₂/л. В частности, в эвтрофных водоемах во время цветения воды часто образуется новое органическое вещество, высвобождающее кислород в водную среду (Логина, 2015).

3.2 Роль растворенного метана в воде и донных отложениях

Метан является одним из основных компонентов газового состава воды и образуется биохимическим путем при разложении органических веществ сообществом метанобразующих бактерий. Впервые о значимости метана как возможного индикатора антропогенного загрязнения и экологического состояния водных экосистем было высказано в работах Федорова Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевой В.О., Кизицкой Р.М. Исследованиями установлено, что содержание метана вместе с содержанием сероводорода, величинами рН и Eh может служить комплексным индикатором биогеохимической обстановки, миграционной активности и токсичности тяжелых металлов в системе «вода – донные отложения» (Заварзин, Кудеяров, 2006).

В природных условиях основными факторами, влияющими на распределение метана в реках, в настоящее время, являются – скорость течения, которая определяет характер механического переноса органического вещества (вынос, транспортировка, аккумуляция), и как следствие, тип донных отложений. Самые высокие концентрации органического вещества, взвешенных частиц и химических элементов наблюдаются там, где тонкозернистые и глинистые илы откладываются в районах с умеренной скоростью течения (Федоров и др., 2007; Гарькуша, Федоров, 2010).

Оседание большого количества взвешенных частиц на морское дно и связанное с этим увеличение накопления органических веществ в таких зонах снижает концентрацию кислорода в воде и ухудшает условия аэрации донных отложений, приводит к формированию в них восстановительной обстановки. Все это оказывает положительное влияние, например, стимулирует рост и дальнейшее развитие анаэробных микробных сообществ, включая метаногенные бактерии (Гарькуша, Федоров, 2021).

3.3 Роль биогенных элементов и органических веществ

Биогенные элементы соединяют живые и неживые компоненты экосистем. Почти все химические элементы (не только биогенные) в экосистемах циркулируют из внешней среды к организмам и снова во внешнюю среду. Биогенные элементы связывают живые и неживые компоненты экосистем. Следует иметь в виду, что материалы, выходящие из биосферного цикла (который длится от десяти до тысяч лет), составляют лишь небольшую часть геологического цикла (который длится миллионы лет). (Савинова, Фалынскова, 2021).

Многолетняя динамика содержания биогенных элементов и нефтепродуктов в речных водах арктического Западно-Сибирского региона характеризуется рядом тенденций к снижению их концентраций. Эта динамика может быть обусловлена снижением антропогенной нагрузки на эти компоненты, увеличением ассимиляции биогенных элементов водной растительностью в результате более благоприятных климатических условий для вегетации, а также увеличением количества осадков в Западной Сибири (30 мм/10 лет за период 1976–2014 гг.) и, как следствием, увеличением водного стока и разбавляющей способности рек (Dzhamalov, Safronova, 2018).

С другой стороны, в большинстве речных экосистем изменчивость содержания органического вещества возрастает. Это связано не с увеличением водности рек, а с усилением процессов протаивания многолетней мерзлоты, вымывания органического вещества (включая гумус) из верхних слоев почвы и другими явлениями, активизация которых в бассейнах арктических рек, скорее всего, обусловлена изменением климата. Тот факт, что на территории Западной Сибири в значительной степени наблюдаются однонаправленные процессы изменения содержания биогенных и органических веществ в речной воде, свидетельствует о региональном характере их причин, т.е. о влиянии общих природных или антропогенных факторов (Решетняк и др., 2019).

Глава 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Методы отбора и консервации проб воды

Во время летних практик 2022 г. на территориях Ямало-Ненецкого автономного округа и Тункинского парка (Республика Бурятия) был произведен отбор проб воды. Все пробы были отобраны с поверхности водных объектов. Перед отбором проб, все подготовленные заранее (вымытые дистиллятом и высушенные) емкости споласкивались пробной водой по три раза. Пробы отбирались для определения следующих параметров: концентрации биогенных элементов, изотопов кислорода и водорода, CDOM (ОРОВ – окрашенное растворенное органическое вещество).

Пробы для последующего анализа в лаборатории на определение ОРОВ были профильтрованы через стекловолокнистые фильтры, отобраны в ёмкости по 0.1 л. Пробы хранились в банках темного стекла, остальные пробы – в пластиковых бутылочках объемом 50-100 мл. Все пробы хранились в холодильнике при температуре не более 5 °С.

Всего было отобрано 9 проб на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (июль) и 21 проба на территории Тункинского Национального парка (август) (рисунок 4). Полученные результаты выполненных в ходе практики измерений представлены в приложении 1.



Рисунок 4 – Карта-схема точек измерений гидрохимических показателей (все отмеченные точки), эмиссии метана с поверхности водных объектов, отбора проб воды и донных отложений на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1135/>)

Территория, где проводились измерения точек 103 и 104, представляет собой карбоновый полигон "Семь Лиственниц". Участок находится на вершине и склонах холма, сложенного ледниковыми отложениями на землях лесного фонда на южной границе лесотундры. Полигон создан с целью инвентаризации запасов и потоков углерода в экосистемах полигона для определения источников и стоков парниковых газов, планирования мероприятий по управлению углеродным балансом (Карбоновый полигон..., 2022). Предположительно, образованию данных озер способствовал термокарст.

На точке Ледник Романтиков измерение проводилось с перигляциального озера (озеро, граничащее с ледником) (рисунок 5).



Рисунок 5 – Ледник Романтиков (фотография Анны Шорниковой)

Озеро около пинго представлено в виде зарастающего озера. При отборе наблюдались частые выходы газов на поверхность, в виде небольших пузырьков (сипов). Точка 105 отобрана на территории города Лабытнанги, в сорока метрах по направлению на юго-восток от деревни Коми.

В г. Салехард измерения проводились с четырех водных объектов. Вдоль каждого водоема наблюдались следы эвтрофикации (на поверхности воды обильно растут водоросли, цветение воды, неприятный запах) (рисунок 6).



Рисунок 6 – Следы эвтрофикации озера Лебяжье, г. Салехард (фотография Анны Шорниковой)

По словам местных жителей на точке отбора 101 ранее был песчаный карьер, позднее построена водозаборная станция, на 2022 год представляет озеро, вдоль берега, которого расположен жилой сектор. Озеро Лебяжье находится на территории частного сектора, в 115 м от которого по направлению на север расположен автодром. Точка 102 представляет собой зарастающий пруд, расположенный около трансформаторных будок г. Салехард. На точке 106 сформирована пойма р. Полуй. На территории участка было отмечено присутствие мусора (жестяные банки, пластиковые бутылки, пачки от сигарет, полиэтиленовые пакеты).

На рисунке 7 представлены точки измерений на территории Тункинского Национального парка (август, 2022 г.).

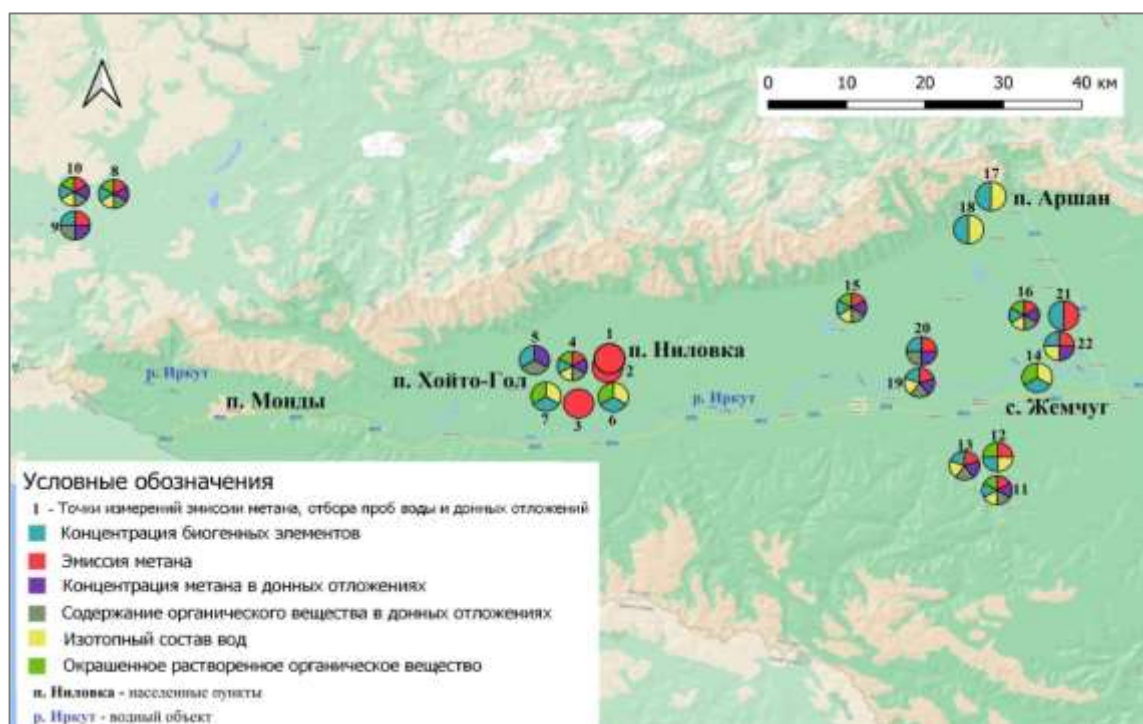


Рисунок 7 – Карта-схема точек измерений гидрохимических показателей (все отмеченные точки, кроме точки 2), эмиссии метана с поверхности водных объектов, отбора проб воды и донных отложений на территории Тункинского парка (<https://qms.nextgis.com/geoservices/1135/>)

Измерения на точках 1–7 проводились на территории Тункинского района – малонаселенная местность с минеральными источниками. Здесь находится бальнеологический курорт «Нилова Пустынь» и начинается туристический пешеходный маршрут к Шумакским источникам, находящихся в пятидесяти километрах от курорта. Измерения гидрохимических показателей на территории минеральных источников «Хонгор-Уула» проводились с трех точек (11, 12, 13). Расстояние от Федеральной автомобильной дороги А-333 «Тункинский тракт» до источников составляет одиннадцать километров. Всего насчитывается выход десяти минеральных вод. Водные объекты на

точках 15, 19, 20 малоизучены. Точки 16, 21, 22 расположены на территории Койморских болот. Вода в озерах закисленная слабоминерализованная гидрокарбонатно-кальциевая, концентрация, как аммонийного азота, так и общего железа достаточно высокая, что характерно для болотных вод (Шевелева и др., 2014). Точки с 8–10 расположены на территории Окинского плоскогорья, здесь распространена островная многолетняя мерзлота. Точка 14 представлена р. Иркут, протекающей по территории курортного с. Жемчуг. Здесь вскрыты два минеральных источника – метановых и углекислых вод. Источник «Субурга» (точка 17) находится в 5 км западнее курорта Аршан. На точке 18 находится источник «Папий». Родник представляет собой небольшое озеро диаметром около 5 м. Состав вод мало изучен.

4.2 Проведение экспресс-анализа на точках отбора проб

Основные гидрохимические характеристики воды – минерализация (TDS – total dissolved salinity), температура воды и pH - измерялись при помощи портативных гидрохимических приборов серии STARTER. Точки отбора описаны в разделе 4.1.

Измерение растворенного кислорода проводилось с помощью кислородомера (оксиметр) STARTER 400D. Режим отображения результатов отображается в ppm, мг/л и %. Диапазон измерения – 20,0–45 мг/л, точность – $\pm 1\%$. Также прибор позволяет измерить температуру воды и воздуха в градусах Цельсия. Перед проведением измерений прибор калибруется по одной точке – по концентрации кислорода в воздухе (рисунок 8).



Рисунок 8 – Портативный кислородомер STARTER 400D (<https://ru.ohaus.com/ru-RU/Starter400DDOPortable-12>)

Метод работы оксиметра основан на электрохимическом анализе концентрации газа. Благодаря диффузии, кислород проникает в датчик и вызывает электрический ток на его электродах. Этот электрический ток соотносится с концентрацией анализируемого газа. После этого напряжение снимается с резистора и поступает в аналоговое цифровое преобразование, где превращается в цифровой сигнал, поступающий на устройство индикации (ОНАУС, 2023).

Измерение кислотности проводилось с использованием рН-метра ST10C-A Ohaus (рисунок 9).



Рисунок 9 – Карманный гидрохимический прибор STARTER для измерения рН (<https://ru.ohaus.com/ru-RU/Products/Instruments-Equipment/Water-Analysis/Starter-Pen-Meters/Pen-Meter-ST10-RU>)

Диапазон (погрешность) рН, ед. рН — от 0 до 14 ($\pm 0,1$). Работа рН-метра основана на разности потенциалов (электродвижущая сила), которая образуется между электродами в исследуемой среде. Можно сказать, что рН-метр – это милливольтметр. Для измерения кислотности среды электрод погружают в исследуемую среду. Так как ионы имеют заряд, то при погружении происходит замыкание электрической цепи между сравнительным и измерительным электродами. Возникает электродвижущая сила, под действием которой электроны переносятся к вспомогательному электроду. Так как внутри трубки концентрация положительно заряженных ионов водорода постоянная, то электродвижущая сила отражает активность ионов водорода в исследуемой среде.

Измерение минерализации водных объектов проводилось кондуктометром ST10C-A Ohaus (рисунок 10). Диапазон измерений модели – 0,0-199,9/0,1 мкСм/см.



Рисунок 10 – Процесс измерения минерализации водоема, озеро Енгаргинское (фотография Юлии Паничевой)

Минерализация представляет собой суммарный количественный показатель содержания растворенных в воде веществ (TDS – total dissolved solids, в переводе общее количество растворенных твердых веществ). Принцип действия прибор основан на

прямой зависимости электропроводности раствора (силы тока в постоянном электрическом поле, создаваемом электродами прибора) от количества растворенных в воде веществ. Устройство создает электрическое поле внутри жидкости, измеряет величину тока, а по ней определяет наличие и концентрацию примесей. Полученные данные выводятся на дисплей прибора. Число, отображенное на нем, означает количество молекул примесей на миллион молекул воды (сокращенно – ppm) (ОНАУС, 2023).

4.3 Определение биогенных элементов в водных объектах

Определение биогенных элементов проводилось только с территории Тункинского парка (Республика Бурятия). Во время полевых исследований в день отбора проводился анализ на содержание в пробах биогенных веществ. Всего было отобрано проб воды с 22 точек. При помощи мини-лаборатории с фотометром в день отбора пробы проводился экспресс анализ на содержание в воде аммония, нитратов, нитритов, кремния. Точки отбора совпадают с точками, описанными в разделе 4.1. Результаты представлены в приложении 2.

Принцип действия фотометров основан на измерении коэффициента пропускания и оптической плотности путем определения отношения интенсивностей полного и прошедшего через анализируемую среду потоков оптического излучения. Концентрация веществ определяется по измеренному значению оптической плотности на фиксированных длинах волн методом построения градуировочных графиков в соответствии с аттестованными методиками выполнения измерений.

Конструкция фотометра включает в себя светодиодные источники излучения, фотометрическую ячейку с кюветным отделением для кювет с длиной оптического пути до 50 мм, систему регистрации и индикации результатов измерений и систему электропитания. Фотометр выполнен в виде малогабаритного настольного, переносного прибора, состоящего из измерительного преобразователя и фотометрической ячейки со сменными источниками излучения. Измерительный преобразователь фотометра выполнен в виде микропроцессорного блока с графическим индикатором и клавиатурой. На задней панели измерительного преобразователя расположены разъемы для подключения фотометрической ячейки, блока питания и компьютера (рисунок 11) (Эконикс ЭКСПЕРТ, 2020).

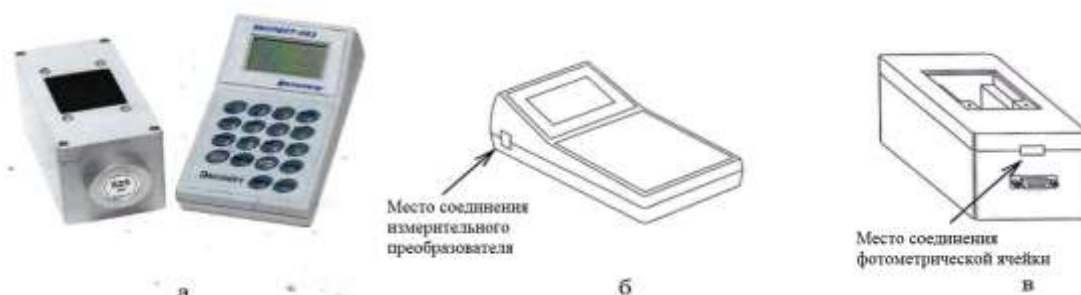


Рисунок 11 – Внешний вид фотометра ЭКСПЕРТ-003 (а), места соединения измерительного преобразователя (б) и фотометрической ячейки (в) (<https://ionomer.ru/file/admin/option/files/ot-003.pdf>)

Для каждого определяемого биогенного вещества в набор входит фотометрическая ячейка с подобранной для анализа длинной волны (Эконикс ЭКСПЕРТ, 2020).

Определение концентрации аммония. Метод основан на взаимодействии ионов аммония и аммиака с реактивом Несслера с образованием окрашенного в жёлто-коричневый цвет соединения. Окраска полученного раствора пропорциональна концентрации аммония.

Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют на фотометре «Эксперт-003» с картриджем «430» в кювете 30 мм относительно дистиллированной воды. Массовая концентрация аммония рассчитывается автоматически по градуировочному графику, сохранённому в памяти фотометра.

Определение концентрации нитратов. Метод основан на восстановлении нитратов металлическим магнием до нитритов, взаимодействующих с реактивом Грисса, состоящего из сульфаниловой кислоты и 1-нафтиламина. Диазотированная нитритами сульфаниловая кислота образует с 1-нафтиламином красно-фиолетовый краситель. Окраска полученного раствора пропорциональна концентрации нитратов.

Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют на фотометре «Эксперт-003» с картриджем «525» в кювете 10×10 мм относительно дистиллированной воды. Массовая концентрация нитратов рассчитывается автоматически по градуировочному графику, сохранённому в памяти фотометра.

Определение концентрации нитритов. Метод основан на взаимодействии нитритов с реактивом Грисса, состоящего из сульфаниловой кислоты и 1-нафтиламина. Диазотированная нитритами сульфаниловая кислота образует с 1-нафтиламином красно-фиолетовый краситель. Окраска полученного раствора пропорциональна концентрации нитритов.

Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют на фотометре «Эксперт-003» с картриджем «525» в кювете 10×10 мм относительно дистиллированной воды.

Массовая концентрация нитритов рассчитывается автоматически по градуировочному графику, сохраненному в памяти фотометра.

Определение концентрации кремния. Метод основан на взаимодействии мономерно-димерных форм кремнекислоты и силикатов с молибдатом аммония в кислой среде с образованием кремнемолибденовой гетерополикислоты желтого цвета. Интенсивность окраски пропорциональна концентрации кремнекислоты и силикатов.

Оптическую плотность окрашенного раствора измеряют на фотометре «Эксперт-003» с картриджем «400» в кювете 10 мм относительно дистиллированной воды. Содержание мономерно-димерных форм кремнекислоты и силикатов в пересчете в массовую концентрацию кремния рассчитывается автоматически по градуировочному графику, сохраненному в памяти фотомера.

4.4 Измерение эмиссии метана с поверхности озер

Измерения эмиссии метана с поверхности водных объектов на территории Ямала осуществлялось с 4 точек; с территории Тункинского парка с 16 точек. Измерение метана осуществлялось с трех точек озера: прибрежная полоса наземной части, литораль водоема, поверхность водоема (2 точки). Описание точек совпадает с точками указанными в разделе 4.1.

Измерение эмиссии метана с поверхности водных объектов проводилось методом камер, описанным в работе В.М. Ивахова с соавторами (Ивахов и др., 2020). Методика отбора была скорректирована, вместо стандартных камер, помещаемых в стационарных условиях на поверхность водоема, для удобства перевозки приборов был использован пластиковый таз с площадью основания $0,59 \text{ м}^2$ и рабочим объемом $0,029 \text{ м}^3$ (рисунок 12), – широко применяемый в настоящий момент во многих полевых исследованиях.



Рисунок 12 – Камера (а) для отбора и измерения проб метана (Ивахов и др., 2020) на озере (б) (фотография Ульяны Гусельниковой)

Измерения потоков CH_4 проводилось с помощью камеры, представляющей собой пластмассовый таз с отверстием сверху 3×5 см для входа датчика-газоанализатора. В зоне

осушки камера ставится на поверхность водоема. Граница камеры и воды образует естественный гидрозатвор.

В роли крышки была использована клейкая лента (скотч), закрывающая отверстие в несколько слоев. После каждого использования происходила ее замена. Время выдержки камеры составляло 10 минут. Измерение концентрации метана осуществлялось при помощи цифрового детектора горючих газов SPD202/EX (рисунок 13).



Рисунок 13 – Цифровой детектор горючих газов SPD202/EX
(<https://proconsamexico.com/productos/detectores-de-gas/explosimetros/explosimetro-spd202ex/>)

Диапазон измерения: 0 ~ 100 % ~ 50000 ppm CH₄. По паспорту погрешность измерения – не более ±2% (Detector..., 2020). Измерения эмиссии метана на исследуемых водоемах проводилось с трех точек: прибрежная полоса наземной части, литораль водоема, поверхность водоема (2-3 точки).

Обработка результатов измерений. Измерение эмиссии метана (ppm) в дальнейшем пересчитывалось на удельный поток метана (мгCH₄/м²×час) для более удобного сравнения с литературными источниками.

Для расчета массы газа в пробе используется уравнение состояния идеального газа, из которого следует (Смагин, 2005):

$$m = c_1 \cdot P \cdot X^{\%} \cdot M \cdot V / (R \cdot T), \quad (1)$$

$$[m] = \text{мг}/(\text{кг}\cdot\%) \cdot (\text{Н}/\text{м}^2) \cdot \% \cdot (\text{кг}/\text{моль}) \cdot \text{м}^3 \cdot (\text{моль}\cdot\text{К}/\text{Дж})/\text{К} = \text{мг}$$

где $c_1 = 10\,000 \text{ мг}/(\text{кг}\cdot\%)$;

M – молярная масса газа (кг/моль);

m – масса данного компонента (мг);

P – общее давление газовой смеси (Па);

R – универсальная газовая постоянная (8,31441 Дж/моль/К);

T – абсолютная температура (К);

V – общий объем газовой фазы (м³);

$X^{\%}$ – объемное содержание данного компонента (%).

В нашем случае объемное содержание компонента выражается не в %, а в ppm (1 % = 10⁴ ppm) и формула имеет вид:

$$m = c_2 \cdot P \cdot X^{\text{ppm}} \cdot M \cdot V / T \quad (2)$$

где $c_2 = 0,12 \text{ мг} \cdot \text{моль} \cdot \text{К} / (\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{ppm})$.

Итак, окончательно для расчета удельного потока имеем:

$$F = c_2 \cdot P \cdot M \cdot (X^{\text{ppm}} / T - X_0^{\text{ppm}} / T_0) \cdot V / (t \cdot S) \quad (3)$$

где X_0^{ppm} и X^{ppm} – соответственно, концентрации исследуемого газа в камере в начальный и конечный моменты времени (при температурах T_0 и T).

4.5 Отбор проб и измерение концентрации метана донных отложений

Всего для определения концентрации метана в донных отложениях отобрана 31 проба: 7 на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (3 из них в г. Салехард), 24 на территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия). На территории Ямало-Ненецкого автономного округа пробы отбирались с верхних слоев донных отложений. На территории Тункинского парка пробы отбирались при помощи колонки донных отложений с горизонтов керна от 0 до 23 см.

Метан образуется в результате воздействия различных видов микроорганизмов на органическое вещество, образуемое как в самом водоеме, так и поступающее извне вследствие хозяйственной деятельности человека. Отбор проб и последующее определение метана проводится согласно методике определения метана газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара (РД 52.24.511-2013). Данная методика позволяет осуществлять оперативную оценку степени загрязнения водного объекта органическими веществами и оконтуривание зоны распространения поступающего антропогенного загрязнения из донных отложений.

Отбор проб донных отложений. Отбор проб производится пластмассовой трубкой длиной 120 см и диаметром 6,2 см.

Донные отложения представляют вид керна (рисунок 14). В качестве пробоотборника используются пластиковые (инъекционные) шприцы вместимостью 5 см³ с отрезанной нижней частью. Пробоотборник вдавливают в образец донных отложений с таким расчетом, чтобы объем отобранной аликвоты составил 1 см³. Если отложения имеют жидкую консистенцию, вдавливая пробоотборник, следует одновременно поднимать поршень. Шаг отбора проб – 10 см относительно друг друга.



Рисунок 14 – Колонка донных отложений, оз. Гурокше-Нур (Республика Бурятия) с отверстиями для взятия проб (фотография Шорниковой Анны)

После отбора пробу выдавливают поршнем в пластмассовые баночки, заполненные дистиллированной водой объемом 30 мл, содержащей 3 мкл раствора серной кислоты 50 % концентрации и герметично закрывают.

Резьба флакона не должна быть загрязнена донными отложениями во избежание утечки метана. В случае необходимости загрязнение удаляют ватой, смоченной дистиллированной водой. После герметизации пробу энергично встряхивают, чтобы не осталось слипшихся комочков.

Метод измерений массовой доли метана. Выполнение измерений массовой доли метана газохроматографическим методом основано на анализе равновесного пара над водой (РД 52.24.511-2013).

Флаконы с пробой помещают в термостатирующую баню при температуре (50 ± 1) °С и выдерживают $(30 \pm 0,5)$ мин для установления равновесия. В течение этого времени флаконы не менее четырех раз энергично встряхивают. Если выполняют анализ серии проб, флаконы помещают в термостат поочередно так, чтобы время установления равновесия во всех флаконах было одинаковым - $(30 \pm 0,5)$ мин.

При отборе и вводе равновесного пара с помощью предварительно подогретого шприца вводят иглу шприца во флакон и отбирают 0,5 мл пара и немедленно вводят в испаритель хроматографа (рисунок 15).



Рисунок 15 – Процесс ввода пара в испаритель хроматографа Хроматэк-Кристалл 5000 (фотография Климовой Анны, оборудование КарНЦ РАН)

Качественную идентификацию метана осуществляют по времени удерживания при сравнении хроматограмм пробы и градуировочного образца.

Расчет количественного содержания метана проводят по соотношениям высот или площадей хроматографических пиков на хроматограммах градуировочного образца и пробы воды.

Обработка результатов измерений. Массовую долю метана в пробе донных отложений X , мкг/г, рассчитывают по формулам (4) и (5) при использовании в качестве градуировочных образцов растворов метана (РД 52.24.511-2013).

$$X = \frac{q_m \cdot h_x}{h_r \cdot m}, \quad (4)$$

$$X = \frac{q_m \cdot S_x}{S_r \cdot m}, \quad (5)$$

где h_x - высота хроматографического пика метана на хроматограмме анализируемой пробы, мм или отн. ед. (при компьютерной обработке сигнала);

h_r - высота хроматографического пика метана на хроматограмме градуировочного образца, мм или отн. ед. (при компьютерной обработке сигнала);

S_x - площадь хроматографического пика метана на хроматограмме анализируемой пробы, мм² (при регистрации аналитического сигнала на самописце) или отн. ед. (при компьютерной обработке сигнала);

S_r - площадь хроматографического пика метана на хроматограмме градуировочного образца, мм² или отн. ед. (при компьютерной обработке сигнала);

m - масса донных отложений, помещенных во флакон, г.

При необходимости определяют влажность донного осадка, высушивая их навеску в бюксе до постоянной массы при 105 °С и производят соответствующий пересчет массовой доли метана на сухой остаток.

Массовую долю сухого остатка в образце анализируемых донных отложений метана, отн. ед., определяют по формуле (3):

$$M = \frac{m_{\text{бс}} \cdot m_{\text{б}}}{m_{\text{бвл}} - m_{\text{б}}}, \quad (6)$$

где $m_{\text{бс}}$ - масса бюкса с высушенной до постоянной массы навеской донных отложений, г;

$m_{\text{б}}$ - масса пустого бюкса, г;

$m_{\text{бвл}}$ - масса бюкса с навеской донных отложений, г.

4.6 Содержание органического вещества в донных отложениях

Отбор проб донных отложений проводился только на территории Тункинского национального парка с 11 точек. Для отбора проб использовались те же колонки донных отложений, что и на определение концентрации метана. Всего для проведения лабораторного анализа было отобрано 24 пробы с горизонтов керна от 0 до 23 см.

Таблица 3
Точки отбора проб воды на окрашенное растворенное органическое вещество (ОРОВ)

| № | № на схеме | № пп | Место отбора проб | Дата отбора | N | E |
|----|------------|------|--|-------------|------------|-------------|
| 1 | 14 | 29 | р. Иркут, п. Вышка, ТП* | 11.08.2022 | 51,714273° | 102,430685° |
| 2 | 4 | 6 | оз. Гурокшэ-Нур, ТП | 05.08.2022 | 51.706363° | 101.633631° |
| 3 | 11 | 19 | Желудочный источник, рекреационный центр «Хонгор-Уула», ТП | 11.08.2022 | 51.601333° | 102.359083° |
| 4 | 6 | 8 | р. Ихе-Ухгунь, ТП | 06.08.2022 | 51,704184° | 101,655393° |
| 5 | 8 | 15 | 103, пойма р. Сусер, ТП | 08.08.2022 | 51.910543° | 101.743884° |
| 6 | 15 | 30 | оз. Енгаргинское, ТП | 12.08.2022 | 51.765797° | 102.438165° |
| 7 | 9 | 16 | оз. Окинское, ТП | 08.08.2022 | 51.912749° | 100.668085° |
| 8 | 5 | 7 | 101, приток реки р. Ихе-Ухгунь, с. Хойто-Гол, ТП | 06.08.2022 | 51,713424° | 101,655393° |
| 8 | 12 | 21 | Глазной источник, рекреационный центр «Хонгор-Уула», ТП | 13.08.2022 | 51.600245° | 102.360232° |
| 10 | 16 | 33 | оз. Шоршонка, ТП | 12.08.2022 | 51.765797° | 102.438165° |

Продолжение таблицы 3

| | | | | | | |
|----|-----|----|--|------------|------------|-------------|
| 11 | 13 | 23 | болото у источников, рекреационный центр «Хонгор-Уула», ТП | 11.08.2022 | 51.588865° | 102.332334° |
| 12 | – | 1 | Озеро около пинго, Ямал | 18.07.2022 | 66.470263° | 67.514228° |
| 13 | – | 2 | Озеро Лебяжье, Ямал | 19.07.2022 | 66.533584° | 66.654556° |
| 14 | 101 | 3 | озеро в г. Салехард, Ямал | 19.07.2022 | 66.530859° | 66.660624° |
| 15 | 102 | 4 | зарастающий пруд в г. Салехард, Ямал | 19.07.2022 | 66.530859° | 66.660624° |
| 16 | 103 | 5 | термокарстовое озеро на карбоновом полигоне, Ямал | 20.07.2022 | 66.710648° | 66.349038° |
| 17 | 104 | 6 | озеро на карбоновом полигоне, Ямал | 20.07.2022 | 66.711574° | 66.344275° |
| 18 | – | 7 | Перигляциальное озеро (ледник Романтиков), Ямал | 21.07.2022 | 66.899717° | 65.435800° |
| 19 | – | 8 | протока Вылпосл, г. Лабытнанги, Ямал | 22.07.2022 | 66.654697° | 66.418886° |
| 20 | – | 9 | пойма р. Полуй в г. Салехард, Ямал | 22.07.2022 | 66.527509° | 66.585286° |

ТП – Тункинский парк (Республика Бурятия)*

Отбор проб производится в соответствии ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных водных объектов для анализа их загрязнения». Пробы отбирались из колонки донных отложений, описанной в разделе 2.3, через каждый 10 см. Отбор производился в пакеты Zip Lock размером 50×70 мм, подписывались и упаковывались. Консервация проб не проводилась. Хранение и транспортировка проб осуществлялись при температуре не выше +5 °С. Анализ проб проводился в учебной лаборатории физико-химического анализа Санкт-Петербургского государственного университета по методике Опекуновой и др. (2015).

Потерей при прокаливании (ППП) называют изменения массы почвы при нагревании до температуры 900 °С. При этом происходит потеря кристаллизационной и конституционной воды, выделение и полное разрушение CO₂ карбонатов, окисление закисных форм железа, частичная потеря хлоридов калия и магния. Потерю при прокаливании используют для вычисления общего содержания минеральных веществ, для пересчета содержания минеральных веществ в почве, донных отложениях на прокаленную навеску. Величина при прокаливании меняется от 2-3 % до 10-15 % для минеральных горизонтов суглинистых и глинистых почв. В органогенных горизонтах может превышать 30 % (Опекунова и др., 2015).

Ход определения. Во взвешенный на аналитических весах прокаленный тигель берут навеску. Тигель с донным осадком взвешивают и ставят в холодный муфель на

прокаливание. Его проводят в течение четырех часов при температуре 900 °С. По окончании прокаливания тигель охлаждают в эксикаторе и взвешивают. Повторное прокаливание проводят в течение 30 минут. Затем тигель вновь охлаждают и взвешивают (Опекунова и др., 2015).

Вычисление проводилось по формуле (4):

$$\text{ППП \%} = \frac{(a-b) \cdot 100 \cdot K_{H_2O}}{c}, \quad (7)$$

где $(a-b)$ – потеря в весе, г;

K_{H_2O} – коэффициент гигроскопической воды;

c – навеска, г.

Вычисление коэффициент гигроскопической воды:

$$\% H_2O_{\text{гигр.}} = \frac{(b-c) \cdot 100}{c-a}$$

$$K_{H_2O} = \frac{100 + \%H_2O}{100}$$

$\% H_2O_{\text{гигр.}}$ – содержание гигроскопической воды, %;

K_{H_2O} – коэффициент гигроскопической воды;

a – вес пустого бюкса;

b – вес бюкса с почвой до просушивания;

c – вес бюкса с почвой после просушивания.

4.7 Определение растворенного окрашенного органического вещества в воде

В ходе полевых исследований произведен отбор проб на содержание окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) на территории Ямало-Ненецкого автономного округа в период с 18 по 24 июля 2022 года – 9 проб; на территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия) с 4 по 19 августа 2022 года – 11 проб (таблица 3). Описание точек представлено в разделе 4.1.

Органическое вещество – составляющая любых внутренних водоемов. Окрашенная фракция растворенного органического вещества (ОРОВ), в англоязычной литературе *CDOM* (coloured dissolved organic matter), является значимым компонентом водных экосистем (Скопинцев, 1950; Kalle, 1966), включая термокарстовые озера высокоширотной Арктики (Vincent et al., 1996).

Поглощая, главным образом, коротковолновое излучение (ультрафиолетовое и голубой участок видимого диапазона), ОРОВ может оказывать на степень проникновения солнечного света в глубинные слои водных объектов, а также на их температурный режим (Zaneveld, 1975; Vincent, Pienitz, 1996; Twardowski, Donaghay, 2005).

Растворенное органическое вещество (РОВ) в водоемах может иметь два вида происхождения: автохтонное и аллохтонное (Kalle, 1966). Автохтонное РОВ образуется непосредственно в водоеме, как продукт жизнедеятельности фитопланктона, в то время как аллохтонное РОВ поступает из окружающего его водосбора. В северных высокоширотных озерах автохтонное РОВ не играет большой роли в формировании общей концентрации растворенного органического углерода из-за неблагоприятных климатических условий и недостаточной численности фитопланктона, в то время как аллохтонное РОВ может составлять основную часть концентрации РОУ (Engstrom, 1987; Wetzel, 2001).

В работе оценивались параметры ОРОВ:

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

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

3. S_r – коэффициент уклона спектральной кривой – отношение S (ультрафиолетовый) / S (видимый) может использоваться в качестве индикатора фотодеградациии (дает информацию о возрасте ОРОВ). Величина $S_r = 1,2$ – типичное значение S_r для поверхности пресной воды; $S_r > 1,2$ может указывать на фотодегградацию (Skorospekhova et al., 2013-2016).

Обработанные на спектрофотометре результаты автоматически пересчитывались с помощью программы CDOM.

Процесс определения ОРОВ производился в лаборатории Отто-Шмидта (Санкт-Петербург) с использованием спектрофотометра фирмы SPECORD200 (рисунок 16). Пределы допускаемой абсолютной погрешности спектрофотометра при измерении коэффициента направленного пропускания – $\pm 0,5 \%$. Анализ проводился в диапазоне 200-750 нм (ультрафиолетовый и видимый участки электромагнитного спектра) и позволил определить спектры поглощения в каждой пробе. Анализ был проведен с оптическим разрешением прибора – 1 нм.



Рисунок 16 – Спектрофотометр SPECORD200 в лаборатории Отто-Шмидта (Фотография Анны Шорниковой)

Ход определения (Спектрофлуориметрия..., 2009-2023):

- 1) Включить спектрофотометр SPECORD200. Для выполнения стабильных измерений необходимо прогреть прибор 2-3 часа. Образцы для обработки должны быть комнатной температуры.
- 2) Для проведения анализа использовать кюветы, заранее промытые дистиллированной водой. Гладкие стенки кюветы должны быть чистыми (без отпечатков) и сухими.
- 3) После прогрева спектрофотометра включается компьютер с установленным программным обеспечением для проведения анализа – WINASPECT (Jena Analytic).
- 4) Провести первичное сканирование. Установить необходимый динамический диапазон и спектральное разрешение измерений.
- 5) Запустить эталон дистиллированной воды в качестве образца. Полученный спектр должен быть нулевым с относительно небольшим разбросом (между +0,005).
- 7) Заменить дистиллированную воду на отобранный образец в кювете (выньте кювету из держателя, опорожните ее, промойте водой для образца, заполните кювету образцом, очистите кювету снаружи). Закрывать отсек для отбора проб и просканировать образец.

При проведении анализа детектор прибора измеряет интенсивность света после прохождения сквозь кюветы с пробой воды относительно начальной интенсивности:

$$T(\lambda) = I / I_0, \quad (8)$$

где I – зарегистрированная интенсивность света после прохождения сквозь кюветы, I_0 – исходная интенсивность света, сгенерированного лампой (определяется регулярными калибровочными измерениями).

Для получения значений оптической плотности исследуется абсорбция (A_0) волн органическим веществом, которая выводится из уравнения (5):

$$A_0(\lambda) = -\log(I / I_0) \quad (9)$$

Для трансформирования этого значения в абсорбцию на метр (приведенное значение), следует пересчитать полученное значение с приведением к натуральному логарифму и с учетом длины кюветы (5) в метрах:

$$\alpha_{\text{ОРОВ}}(\lambda) = 2,303 * A_0 / l \quad (10)$$

В исследовании применялись кварцевые кюветы длиной 0,05 м.

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

При обработке спектров поглощения ОРОВ вычислялся наклон кривой абсорбции ОРОВ – S (нм^{-1}), который определяется между длинами волн 350 и 500. Вычисления производились по формуле:

$$a_{\text{ОРОВ}}(\lambda) = a_{\text{ОРОВ}}(\lambda_0) e^{-S(\lambda - \lambda_0)} \quad (11)$$

где λ_0 – длина волны, равная 440 нм,

λ – длина волны на границе рассматриваемого диапазона.

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

Кроме того, вычислялся параметр Sr – коэффициент уклона спектральной кривой по формуле:

$$Sr = S(275-295) / S(350-400) \quad (12)$$

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

Все перечисленные выше расчеты для анализа проводились с помощью компьютерной программы CDOM.

4.8 Изотопный состав вод

В период летних полевых практик 2022 года в июле на территории Ямало-Ненецкого автономного округа и в августе Тункинского национального парка на изотопный состав было отобрано 24 пробы воды. Измерения отбор проб на изотопный состав с поверхности водных объектов на территории Ямало-Ненецкого автономного округа осуществлялось с 9 точек, Тункинского парка – 15 точек. Описание точек совпадает с точками указанными в разделе 4.1.

В последние десятилетия в качестве надежных маркеров гидрологических и климатических изменений эффективно используют стабильные изотопы кислорода (в виде параметра $\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) (Joussaume, Sadourny, Jouzel, 1984; Delavau, Stadnyk, Holmes, 2017).

Между содержанием дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках существует тесная корреляционная связь, которая описывается уравнением: $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰}$ (VSMOW). Закономерное распределение изотопного состава осадков в координатах $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ называют глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ) (Craig, 1961; Ферронский, Поляков, 2009). Изменения в системе $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ конкретного региона характеризуются локальной линией метеорных вод. Расположение измеренных величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ относительно глобальной линии метеорных вод применяют при интерпретации изотопных данных. По отклонению изотопных отношений $\delta^{18}\text{O} \dots \delta^2\text{H}$ от ГЛМВ возможно оценить процессы изотопного фракционирования. Предложенный В. Дансгором (Dansgaard, 1964) на основе теоретического обоснования ГЛМВ расчетный показатель дейтериевый эксцесс (d-excess – сокращенно $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$), успешно применяют для оценки источников поступления атмосферных осадков (водяного пара). Дейтериевый эксцесс показывает избыток дейтерия по отношению к кислороду-18. Для точек изотопного состава, лежащих на линии ГЛМВ, $d_{\text{ex}} = 10 \text{ ‰}$, ниже этой линии – $d_{\text{ex}} < 10 \text{ ‰}$, что характерно для процессов изотопного фракционирования (Merlivat, Jouzel, 1979; Fricke, O’Neil, 1999).

В 1958 году Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирная метеорологическая ассоциация приняли совместную международную программу по измерению изотопного состава воды в окружающей среде. GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), функционирующая с 1961 года, является сетью по систематическому сбору данных пространственного распределения изотопов кислорода и водорода в атмосферных осадках по всему земному шару для дальнейшего определения и моделирования их пространственно-временных вариаций на региональном и глобальном уровнях. Данная система (Международное агентство по атомной энергии, 2023) стала основой статистического анализа данных в исследуемых районах (ЯНАО, Тункинский парк) (Международное агентство по атомной энергии..., 2023).

Определение изотопного состава вод был выполнен на базе Ресурсного центра «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, при помощи лазерной спектроскопии (CRDS) – на приборе Picarro-L2130i (выпуск 2021 г, США). Для измерения использованы стандарты USGS-45 и USGS-46, аппаратурная ошибка измерений составила $\pm 0,02 \text{ ‰}$ по кислороду-18 и $\pm 0,1 \text{ ‰}$ по дейтерию (Непрерывный мониторинг..., 2023).

Работа газоанализаторов и изотопных анализаторов Picarro основана на методе WS-CRDS (Wavelength Scanned Ring Down Spectroscopy). В русскоязычной литературе термин переводится как «Спектроскопия поглощения света в многопоточных

неаксиальных кюветах при сканировании по длинам волн». Этот тип спектроскопии основан на поглощении энергии ИК-лазера малыми молекулами при характеристичных длинах волн. При давлениях ниже атмосферного газы дают спектры в ближней ИК-области, состоящие из хорошо разрешенных, очень узких полос поглощения. Однако, в классических ИК-методах газы дают слишком слабые полосы поглощения и пределы обнаружения составляют в лучшем случае миллионные доли (ppm). Метод WS-CRDS удачно обходит эти ограничения (Непрерывный мониторинг..., 2023).

Все анализаторы Picarro созданы на основе проверенной технологии спектроскопии с кольцевым спадом в полости (CRDS). Это сложное измерение, основанное на времени затухания сигнала, использует лазер для количественного определения спектральных характеристик молекул газовой фазы в оптической полости. Луч от одночастотного лазерного диода попадает в трехзеркальную полость (измерительную кювету), создавая непрерывную бегущую световую волну, как показано на рисунке 17. Лазер фиксируется на запатентованном мониторе длины волны для обеспечения спектральной точности. Когда лазер включен, полость заполняется циркулирующим лазерным светом. Быстрый фотодетектор улавливает небольшое количество света, проходящего через одно из зеркал, и генерирует сигнал, прямо пропорциональный интенсивности поглощения изотопами молекул воды в полости (Непрерывный мониторинг..., 2023).

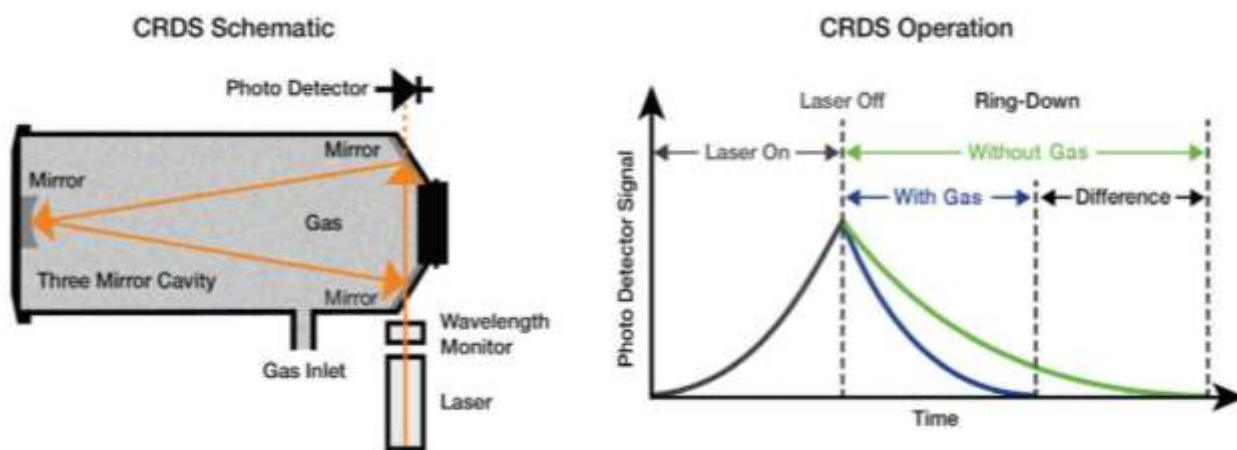


Рисунок 17 – Процесс преобразования улавливаемого газа в световую волну (слева), функция зависимости поглощения от времени (справа) (<https://www.picarro.com/company/technology>)

Технология CRDS компании Picarro обеспечивает высокую точность измерений, наименьший дрейф сигнала во времени. Запатентованный монитор длины волны Picarro поддерживает частоты лазера и чувствительность, обеспечивая воспроизводимость в независимости от времени и условий окружающей среды.

4.9 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ помогает установить, есть ли между показателями в одной или двух выборках связь. Если связь имеется, то влечет ли увеличение одного параметра повышение (положительная корреляция) либо уменьшение (отрицательная) другого. Корреляционный анализ помогает определить, можно ли использовать значения одного показателя для прогнозирования возможных значений другого показателя (Кошелева, 2012).

Коэффициент корреляции обозначается r . Варьируется в пределах от +1 до -1. Классификация корреляционных связей для разных сфер будет отличаться. При значении коэффициента 0 линейной зависимости между выборками не существует, при значении 1 – существует прямая зависимость. Расчет коэффициентов корреляции определяется с помощью средств Excel, функции КОРРЕЛ. Значимость полученных значений определялась по методу ранговой корреляции Спермина (Кошелева, 2012; Баврина, Борисов, 2021).

Глава 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Результаты гидрохимических экспресс-анализов

Измерение растворенного кислорода проводилось на 8 точках Тункинского парка. Величина измерений варьировала от 6,81 мг/л до 14,9 мг/л. В соответствии с требованиями к составу и свойствам воды водоемов у пунктов питьевого и санитарного водопользования содержание растворенного кислорода в пробе, не должно быть ниже 4 мг/л в любой период года (СанПиН 1.2.3685-21); для водоемов рыбохозяйственного назначения концентрация растворенного в воде кислорода не должна быть ниже 6 мг/л в летний период (Приказ Министерства сельского хозяйства N552). Проанализировав данные таблицы, можно отметить, что все водные объекты по показателю растворенного кислорода находятся в пределах нормы (приложение 1). Среднее относительное содержание кислорода составило 101,7 %, что относит воды к очень чистому (I) классу качества воды (Гусева, Молчанова, Зайка и др., 2000).

Температура водных объектов на территории Ямала в среднем составила +19,9 °С, на территории Тункинского парка 14,9 °С. По показателю кислотности воды изменяются от слабокислых до щелочных. Все воды, измеренные кондуктометром, относятся по классификации О.А. Алекина к пресным водам (Орлова, Базлов, Орлов, 2013).

5.2 Результаты полученных концентрации биогенных элементов

На рисунках 18, 19, 20, 21 представлены результаты измерений биогенных элементов в водных объектах Тункинского парка по аммоний, нитратам, нитритам, кремнию в сравнение с ПДК для объектов рыбохозяйственного значения и питьевого снабжения.

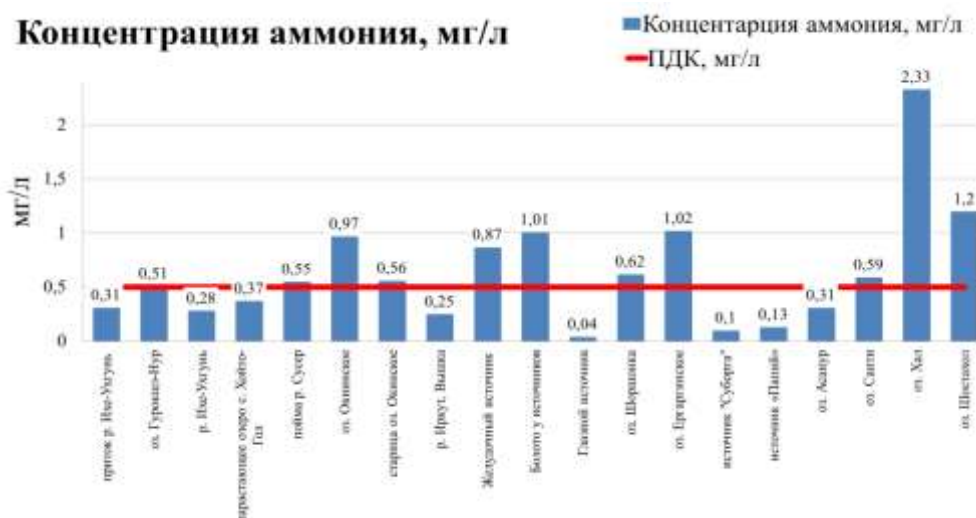


Рисунок 18 – Гистограмма концентрации аммония в водных объектах Тункинского парка, мг/л

По нормам Приказа Министерства сельского хозяйства № 552 ПДК по аммоний-иону для объектов рыбохозяйственного значения составляет 0,5 мг/л (в пересчете на азот 0,4). ПДК безвредности для человека, как фактора среды обитания не установлено (СанПиН 1.2.3685-21).

Превышение было отмечено на 11 из 19 исследуемых объектах. Особо выделяются источник в п. Аршан, озера – Холл, Окинское, Енгаргинское, Шостахол в Тункинской долине. Присутствие аммония в концентрациях порядка 1 мг/л снижает способность гемоглобина рыб связывать кислород. Повышенная концентрация ионов аммония может быть использована в качестве индикаторного показателя, отражающего ухудшение санитарного состояния водного объекта, процесс загрязнения поверхностных и подземных вод, в первую очередь, бытовыми и сельскохозяйственными стоками.



Рисунок 19 – Гистограмма концентрации нитратов, мг/л

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по содержанию нитратов составляет 45,0 мг/л (СанПиН 1.2.3685-21). ПДК для объектов рыбохозяйственного значения не установлено. Наличие нитратов в воде говорит о естественном самоочищении водоема. В чистой природной воде содержание нитратов не превышает 1-2 мг/л. По содержанию нитратов концентрация нитратов соответствует норме. Превышение ПДК не наблюдалось.



Рисунок 20 – Гистограмма концентрации нитритов, мг/л

Согласно нормам СанПиН 1.2.3685-21, в питьевой воде ПДК нитритов не должна быть выше 3,0 мг/л. Исходя из указанных данных, все воды по показателям ПДК можно отнести к питьевой воде. Но для природных вод, не являющимися источниками питьевого снабжения, есть превышающие значения, именно на 12 точках из 19 измеренных (не более 0,01 мг/л).



Рисунок 21 – Гистограмма концентрации кремния, мг/л. Нулевые значения указывают, что результаты значений ниже порога обнаружения фотометра

По содержанию кремния проанализировано 13 проб. В речных и озерных водах массовая концентрация кремния колеблется обычно от 1 до 20 мг/л (РД 52.24.433-2018). В данных пробах превышение показателя ПДК не выявлено. Для поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования значение не должно превышать 20 мг/л (СанПиН 1.2.3685-21). Превышение ПДК не наблюдалось.

5.3 Эмиссия метана с поверхности водных объектов

Результаты измерений потока метана представлены в таблице 4. Измерение эмиссии метана было проведено с поверхности 20 водных объектов: 4 на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, 16 на территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия). Из общего количества на двух измеряемых точках выделение потоков метана было ниже порога обнаружения прибора.

Ямало-Ненецкий автономный округ. Эмиссия метана с поверхности водных объектов варьировалась от 2,4 – 9,9 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Средний поток по территории составил 4,8 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Наибольшее значение отмечено на термокарстовом озере, находящемся на территории карбонового полигона «Семь Лиственниц» (территория г. Лабытнанги). Данное значение оказалось больше в 7 раза, полученных значений, проводимых на данной территории в 2019 году (Kazantsev, Krivenok, Dvornikov, 2019), где исследования проводились на территории, расположенной за пределами селитебных зон. Поэтому стоит предположить, что вклад антропогенной нагрузки, влияющий на таяние многомерзлых пород, может и увеличивать поток метана на данной территории (Игловский, 2013; Василевская, 2017).

Тункинский парк (Республика Бурятия). Эмиссия метана с поверхности водных объектов Тункинского парка (ТП) варьировалась от 0,1–92,3 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Пик эмиссии метана были отмечены на озерах – Шоршонка – 92,3 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$, Енгаргинское – 42,5 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$, Шостахол – 26,5 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Озера удалены от селитебных зон. На двух точках измерений поток метана был ниже порога обнаружения измеряемого прибора. Средний поток по территории Ниловой пустыни составил – 2,6 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$, по территории Окинского плато – 7,0 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. На территории источников «Хонгор-Уула» отмечены наименьшие показатели, средний поток составил – 1,5 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Максимальные значения отмечались у группы озер, расположенных в северно-восточной части Тункинского парка, средний поток составил – 33,6 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Средний поток по территории парка составляет 15,76 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$.

Таблица 4

Результаты измерений потока метана на территории Ямало-Ненецкого автономного округа и Тункинского национального парка
(Республика Бурятия)

| № | № на схеме | № п/п | Дата отбора | Проба, координаты | Поток метана с поверхности водного объекта ср., мгСН ₄ /м ² ·час | Площадь водного объекта, м ² | t, °С |
|----|------------|-------|-------------|--|---|---|-------|
| 1 | 103 | 1 | 20.07.2022 | термокарстовое озеро (Ямал) N 66.710648°, E 66.349038° | 9,9 | 10 658 | 26,9 |
| 2 | 104 | 2 | 20.07.2022 | озеро на карбоновом полигоне (Ямал) N 66.711574°, E 66.344275° | 4,2 | 6 109 | 26,9 |
| 3 | – | 3 | 21.07.2022 | ледник Романтиков (перигляциальное озеро) (Ямал) N 66.899717°, E 65.435800° | 2,5 | 73 474 | 29,6 |
| 4 | 106 | 4 | 22.07.2022 | пойма р. Полуи в г. Салехард (Ямал) N 66.527509°, E 66.585286° | 2,4 | 8 024 | 16,7 |
| 5 | 1 | 3 | 04.08.2022 | старица р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51.708236°, E 101.6475389° | 1,8 | 1 210 | 28,5 |
| 6 | 2 | 4 | 05.08.2022 | заболоченная высокая пойма р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51.705368°, E 101.647482° | ниже порога обнаружения | - | 24,3 |
| 7 | 3 | 5 | 05.08.2022 | заболоченная старица р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51.705536°, E 101.647148° | 0,5 | - | 29,3 |
| 8 | 4 | 6 | 05.08.2022 | оз. Гурокшэ-Нур, п. Ниловка N 51.706363°, E 101.633631° | 5,6 | 24 318 | 34,8 |
| 9 | 5 | 15 | 06.08.2022 | 103, пойма р. Сусер N 51.910543°, E 101.743884° | 8,8 | - | 32,1 |
| 10 | 6 | 16 | 08.08.2022 | оз. Окинское N 51.912749°, E 100.668085° | 8,7 | 403 873 | 33,2 |

Продолжение таблицы 4

| | | | | | | | |
|----|----|----|------------|---|-------------------------|-----------|------|
| 11 | 7 | 17 | 08.08.2022 | старица оз. Окинское N 51.913781°, E 102.673229° | 3,6 | - | 32,6 |
| 12 | 8 | 19 | 11.08.2022 | Желудочный источник, «Хонгор-Уула» N 51.601333°, E 102.359083° | 0,1 | - | 19 |
| 13 | 9 | 21 | 11.08.2022 | Глазной источник, «Хонгор-Уула» N 51.600245°, E 102.360232° | ниже порога обнаружения | - | 20,7 |
| 14 | 10 | 23 | 11.08.2022 | болото у источников, «Хонгор-Уула» N 51.588865°, E 102.332334° | 2,9 | - | 28,9 |
| 15 | 11 | 30 | 12.08.2022 | оз. Енгаргинское N 51.765797°, E 102.438165° | 42,5 | 1 040 000 | 33,6 |
| 16 | 12 | 33 | 12.08.2022 | оз. Шоршонка N 51,766363°, E 102,441486° | 92,3 | 46 361 | 28,4 |
| 17 | 13 | 43 | 17.08.2022 | 104, оз. Асанур N 51.721153°, E 102.215404° | 14,4 | 21 438 | 40,6 |
| 18 | 14 | 44 | 17.08.2022 | оз. Синти N 51.72517° E 102.2210° | 12 | 3 147 | 35,8 |
| 19 | 15 | 45 | 18.08.2022 | оз. Хал N 51.76731° E 102.48091° | 14,3 | 9 677 | 27,1 |
| 20 | 16 | 46 | 18.08.2022 | оз. Шостахол N 51.76437° E 102.47084° | 26,5 | 119 310 | 25,5 |

Примечание: желтый оттенок – измерения Ямала, синие – измерения Тункинского парка

На рисунке 22 представлена гистограмма полученных результатов.



Рисунок 22 – Гистограмма распределения полученных измерений с поверхности водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа (желтый) и территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия) (синий)

Величина потока метана на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) варьировалась от 2,4–9,9 мг СН₄/м²·час, на территории Тункинского парка (ТП) от 0,1–92,3 мг СН₄/м²·час. Озера на территории Тункинского парка (Шоршонка, Шостахол), где отмечались высокие потоки метана, расположены на территории Байкальского биосферного заповедника, территория Койморских болот. Дно многих водоемов здесь покрыто сфагновым мхом, детритом с примесью ила, что способствует накоплению метана (Шевелева и др., 2014). На территории Ямала наибольший пик отмечен на термокарстовом озере, что подтверждает теорию, как о наиболее активном источнике выброса метана в арктических и субарктических районах (Полищук и др., 2015). Превышение полученных значений в 2 раза больше для Ямала, и в 7 раз для Тункинского парка по сравнению с приведенными литературными источниками (таблица 2).

5.4 Концентрации метана в донных отложениях

Всего для определения концентрации метана отобрана 31 проба: 7 на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (3 из них в г. Салехард), 24 на территории Тункинского национального парка (Республика Бурятия) (таблица 5).

Ямало-Ненецкий автономный округ. Наибольшая концентрация метана в донных отложениях отмечается на точке 106, отобранной в г. Салехард равная 381,09 мкл/л, наименьшая на точке 105, отобранной на территории города Лабытнанги – 96,83 мкл/л. Именно на точке 106 во время полевых исследований при отборе пробы отмечались признаки эвтрофикации водоема, а также наблюдался выход газа на поверхность в виде пузырьков (сипов).

Концентрация метана в донных отсадках (пересчет на объемную долю) варьируется от 96,83 мкл/л до 381,09 мкл/л. Наибольшее содержание отмечено в пойме р. Полуй г. Салехард (точка 106). Река является правым притоком р. Оби, где среднее содержание взвешенных веществ около 9,0 мг/л, что является превышением ПДК для объектов рыбохозяйственного значения (норма до 0,75 мг/л) (Приказом Минсельхоза РФ № 552), что может препятствовать газообмену водного объекта, способствовать их консервации.

На территории Ямало-Ненецкого округа наибольшее значение было получено у озера, образованного в результате деградации пинго. На пинго высотой 1,2 м делалась прикопка, в ходе которой было установлено, что здесь торфяные почвы (мерзлота обнаружена на глубине 0,2 м), а значит много органического вещества, способствующему накоплению метана.

Тункинский парк (Республика Бурятия). Значения концентрации метана в донных отложениях варьировалась – от 1,82 мкл/л до 832,12 мкл/л (пересчет на объемную долю); от 0,09 мкг/г до 33,48 мкг/г (доля содержания метана в сухой пробе).

Особый пик увеличения концентрации был отмечен на озере Шоршонка 832,12 мкл/л с горизонта отбора 17 см. Наименьшая концентрация измерена на озере на территории Окинского плато – точки 103 равное 1,82 мкл/л с горизонта отбора 3 см.

Таблица 5

Результаты измерений и расчета концентрации метана в донных отложениях

| № | № на схеме | № п/п пробы | Координаты | Станция | Уровень горизонта h, см | Площадь пика, отн. ед. | Объемная доля метана, мкл/л | Массовая концентрация метана мкг/л | Массовая доля метана в сухой пробе, мкг/г |
|----|------------|-------------|--------------------------------|--|-------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 16 | 1 | N 51.912749°, E 100.668085° | оз. Окинское | 0-3 | 67,112 | 131,57 | 2,88 | 1,22 |
| 2 | 9 | 25 | N 51.713206°, E 101.566777° | 102, зарастающее озеро с. Хойто-Гол | 7 | 86,929 | 170,42 | 3,74 | 4,01 |
| 3 | | 46 | | 102, зарастающее озеро с. Хойто-Гол | 15 | 16,453 | 32,26 | 0,71 | 0,84 |
| 5 | 15 | 23 | N 51.910543°, E 102.743884° | 103, пойма р. Сусер | 1 | 10,013 | 19,63 | 0,43 | 1,61 |
| 6 | | 4 | | 103, пойма р. Сусер | 3 | 0,926 | 1,82 | 0,04 | 0,09 |
| 7 | | 6 | | 103, пойма р. Сусер | 6,5 | 36,579 | 71,71 | 1,57 | 4,80 |
| 8 | 43 | 21 | N 51.721153°, E 102.215404° | 104, оз. Асанур | 3 | 56,478 | 110,72 | 2,43 | 6,22 |
| 9 | | 2 | | 104, оз. Асанур | 8 | 44,359 | 86,96 | 1,91 | 5,82 |
| 10 | | 29 | | 104, оз. Асанур | 13 | 21,261 | 41,68 | 0,91 | 2,74 |
| 11 | 23 | 47 | N 51.588865°, E 102.332334° | болото, «Хонгор-Уула» | 0-3 | 131,971 | 258,72 | 5,67 | 1,95 |
| 12 | | 31 | | болото, «Хонгор-Уула» | 13 | 104,303 | 204,48 | 4,48 | 2,23 |
| 13 | | 16 | | болото, "Хонгор-Уула" | 23 | 148,118 | 290,38 | 6,37 | 2,55 |
| 14 | 19 | 5 | N 51.713424°, E 101.567065° | Желудочный источник «Хонгор-Уула» | 10 | 16,003 | 31,37 | 0,69 | 1,37 |
| 15 | | 14 | | Желудочный источник «Хонгор-Уула» | 18 | 192,347 | 377,08 | 8,27 | 11,41 |

Продолжение таблицы 5

| | | | | | | | | | |
|----|-----|----|--------------------------------|---|------|---------|--------|-------|-------|
| 16 | 6 | 48 | N 51.706363°, E 101.633631° | оз. Гурокше-Нур | 5 | 318,175 | 623,76 | 13,67 | 14,46 |
| 17 | | 12 | | оз. Гурокше-Нур | 15 | 202,584 | 397,15 | 8,71 | – |
| 18 | 30 | 28 | N 51.765797°, E 102.438165° | оз. Енгаргинсоке | 5 | 73,583 | 144,25 | 3,16 | 1,45 |
| 19 | 44 | 18 | N 51.72517° E 102.2210° | оз. Синти | 7 | 182,218 | 357,23 | 7,83 | 26,31 |
| 20 | | 30 | | оз. Синти | 17 | 218,995 | 429,33 | 9,41 | 33,48 |
| 21 | | 11 | | оз. Синти | 22 | 79,831 | 156,50 | 3,43 | 10,59 |
| 22 | 33 | 36 | N 51,766363°, E 102,441486° | оз. Шоршонка | 10 | 50,397 | 98,80 | 2,17 | 0,82 |
| 23 | | 35 | | оз. Шоршонка | 17 | 424,454 | 832,12 | 18,24 | – |
| 24 | 17 | 7 | N 51.913781°, E 102.673229° | старица оз. Окинское | 3 | 11,168 | 21,89 | 0,48 | 0,21 |
| 25 | - | 49 | N 66.899717°, E 65.435800° | ледник Романтиков (перигляциальное озеро) | пов. | 73,137 | 143,38 | 3,14 | – |
| 26 | - | 50 | N 66.470277°, E 67.514722° | озеро около пинго | пов. | 124,219 | 243,52 | 5,34 | – |
| 27 | 105 | 51 | N 67.095833°, E 66.708611° | протока Вылпосл, г. Лабытнанги | пов. | 49,392 | 96,83 | 2,12 | – |
| 28 | 101 | 52 | N 66.530555°, E 66.660277° | озеро в г. Салехард | пов. | 69,628 | 136,50 | 2,99 | – |
| 29 | 106 | 53 | N 66.889166°, E 66.984444° | пойма р. Полуй в г. Салехард | пов. | 194,389 | 381,09 | 8,35 | – |
| 30 | 102 | 54 | N 66.528888°, E 66.688888° | зарастающий пруд в г. Салехард | пов. | 87,409 | 171,36 | 3,76 | – |
| 31 | 103 | 55 | N 67.205555°, E 66.482222° | термокарстовое озеро, карбонный полигон «Семь Лиственниц» | пов. | 99,185 | 194,45 | 4,26 | – |

Примечание: желтый оттенок – измерения Ямала, синие – измерения Тункинского парка

Ямало-Ненецкий автономный округ. Концентрация метана в донных осадках (пересчет на объемную долю) варьируется от 96,83 мкл/л до 381,09 мкл/л. Наибольшее содержание отмечено в пойме р. Полуй г. Салехард (точка 106).

На территории Ямало-Ненецкого округа наибольшее значение было получено у озера, образованного в результате деградации пинго. На пинго высотой 1,2 м делалась прокопка, в ходе которой было установлено, что здесь торфяные почвы (мерзлота обнаружена на глубине 0,3 м), а значит много органического вещества, способствующего аккумуляции метана.

На рисунке 23 представлены результаты концентрации метана (мкл/л) в донных отложениях, отобранные на территории Ямало-Ненецкого автономного округа.



Рисунок 23 – Гистограмма концентрации метана в донных отложениях в сравнении с измеренным потоком метана на территории Ямало-Ненецкого автономного округа

Тункинский парк (Республика Бурятия). Значения концентрации метана в донных отложениях варьировалась – от 1,82 мкл/л до 832,12 мкл/л (пересчет на объемную долю); от 0,09 мкг/г до 33,48 мкг/г (доля содержания метана в сухой пробе).

В соседней Иркутской области (озеро Байкал, ближайшие водные объекты) содержание концентрации метана в донных отложениях варьировалась от 0,03–1,24 мкг/г (пересчет на сухой остаток) (таблица 5). Наибольшая концентрация отмечалась в юной части Байкала в зоне влияния ранее функционировавшего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (закрит в феврале 2013 г.).

На рисунке 24 представлены результаты концентрации метана (мкл/л) в донных отложениях, отобранные на территории Тункинского парка (Республика Бурятия). В зависимости концентрации метана в донных отложениях (мкл/л) на территории Тункинского парка от горизонта отбора пробы наибольшая концентрация обнаруживается

в слое донных отложений от 5–15 см, именно здесь находится наибольшее количество метанообразующих бактерий. Невысокое содержание метанообразующих бактерий, в слое от поверхностного слоя донных отложений до 2 см, связывают с сульфатредуцирующими бактериями, являющимися конкурентами метаногенов за субстрат. А низкое содержание метана в нем – с метанооксиляющими бактериями и с тем, что поверхностный слой донных отложений более всего подвержен механическому воздействию (течение, сгонно-нагонные явления), благодаря которому метан легко переходит в водную толщу (Гарькуша, 2015).

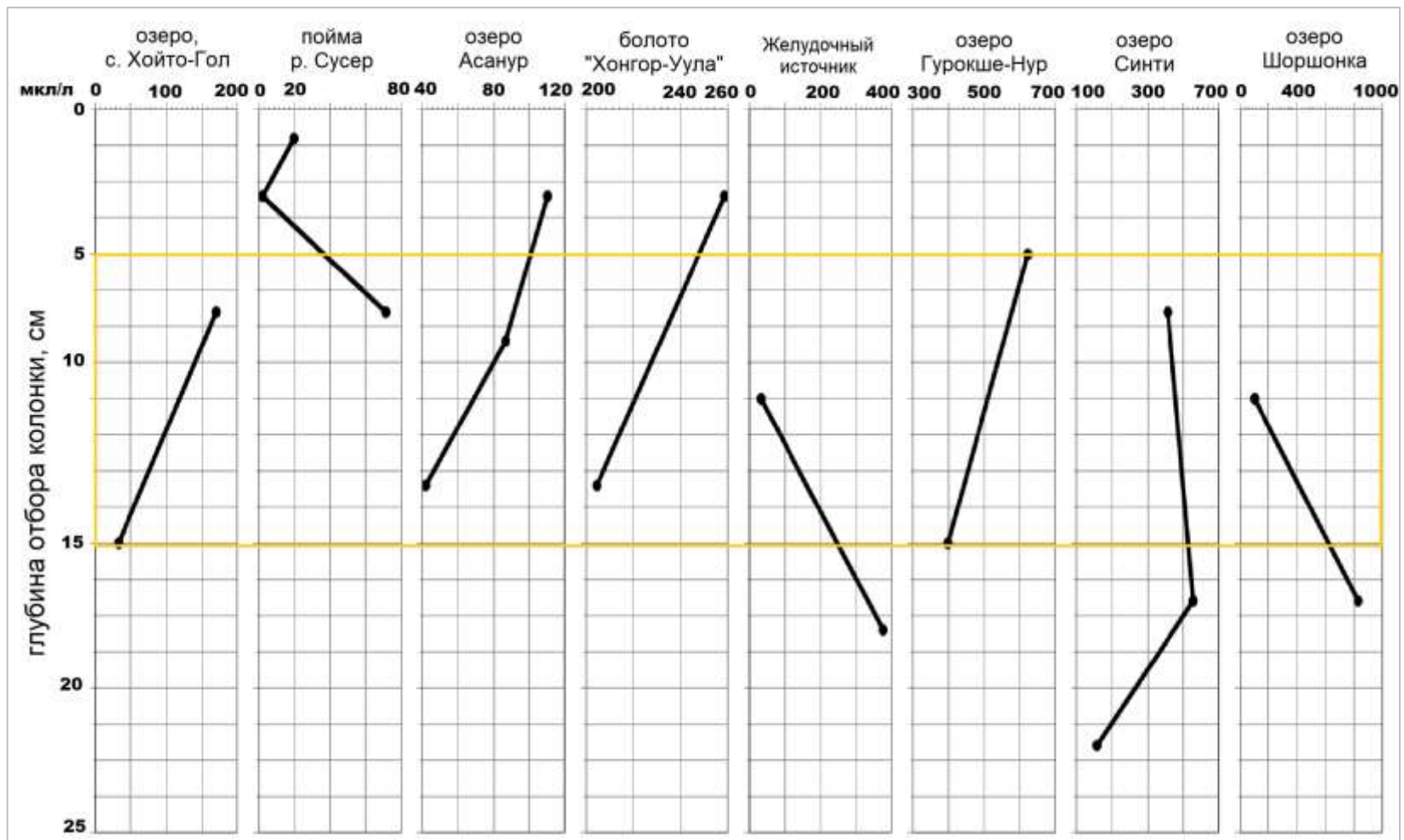


Рисунок 24 – Результаты распределения эмиссии метана (мкл/л) в донных отложениях по глубине (см) на территории Тункинского парка

5.5 Содержание органического вещества в донных отложениях

Всего было обработано 25 проб отобранных на территории Тункинского национального парка с диапазоном горизонтов от 0 до 23 см. Метод потери массы при прокаливании (ППП) рассматривается как один из перспективных подходов для количественного определения органического вещества (ОВ) почв и донных отложений (Konen et al., 2002; Wang et al., 2012; Touch et al., 2017).

По результатам (таблица 6) величина потери при прокаливании составляет от 0,22 до 9,63 %, что согласно методике М.Г. Опекуновой (2015) говорит о происхождении суглинистых и глинистых фракций донных отложений.

Отбор донных отложений в *Ямало-Ненецком автономном округе* на генезис происхождения не был отобран, но в работе Д.Н. Балыкина (2019) отмечается, что величина потери при прокаливании может составлять от 80 до 90 %. Также на территории распространения многомерзлых пород в зоне северо-восточной Якутии данная величина варьируется от 32 до 51 % (Десяткин и др., 2022). Особенностью данного генезиса является наличие на данной территории распространение сплошной многолетней мерзлоты, что способствует аккумуляции, консервации органического материала в верхних органогенных (торфяных, торфяно-перегнойных) горизонтах. В оклеечных и глеевых горизонтах, содержание органического углерода может варьироваться от <0,1 до 1,6 % (Балыкин и др., 2019).

Тункинский парк. В зарастающем озере около с. Хойто-Гол (точка отбор 9) происходит увеличение органического вещества в донных отложениях, связанное с эвтрофикацией водоема, величина потери при прокаливании (ППП) изменяется от 2,62 до 3,28 %. Такая же ситуация наблюдается у болота у источников «Хонгор-Уула» (точка отбора 23) ППП меняется от 8,14 до 9,63 %. Также стоит отметить значительный рост величины ППП с 1,54 до 6,46 % у Желудочного источника (комплекс источников «Хонгор-Уула»; точка отбора 19). Данный рост может быть связан с содержанием в верхних слоях закисного железа, что приводит к увеличению веса (Бабко, Пятницкий, 1962).

На пойме р. Сусер около трассы Монды-Орлик (точка отбора 15) наоборот происходит уменьшение величины ППП с глубиной отбора с 1,00 % до 0,81 %. Уменьшение также происходит у озера Шоршонка (точка отбора 33) от 8,71 до 7,91 % и у протоки около озера Окинского (точка отбора 17) с 7,70 % до 7,57 %.

Таблица 6

Результаты потерь при прокаливании (ППП)

| № | № на схеме | № п/п пробы | Координаты | Место отбора | Горизонт, см | Вес пустого бюкса, гр. | Вес навески, гр. (с) | Бюкс с навеской, гр. (а) | Вес высушенной навески контрольный, гр. (в) | ППП, % |
|----|------------|-------------|--------------------------------|--|--------------|------------------------|----------------------|--------------------------|---|--------|
| 1 | 9 | 19 | N 51.912749°, E 100.668085° | оз. Окинское | 0-3 | 40,8523 | 1,0013 | 41,8536 | 41,7820 | 7,70 |
| 2 | 7 | 22 | N 51.713206°, E 101.566777° | 102, зарастающее озеро с. Хойто-Гол | 7 | 39,1644 | 1,0016 | 40,1660 | 40,1342 | 3,28 |
| 3 | | 7 | | 102, зарастающее озеро с. Хойто-Гол | 15 | 36,4819 | 1,0025 | 37,4844 | 37,4588 | 2,62 |
| 5 | 8 | 13 | N 51.910543°, E 102.743884° | 103, пойма р. Сусер | 0-1 | 36,6372 | 1,0026 | 37,6398 | 37,6317 | 0,81 |
| 6 | | 8 | | 103, пойма р. Сусер | 3 | 49,7860 | 1,0024 | 50,8002 | 50,7884 | 1,19 |
| 7 | | 5 | | 103, пойма р. Сусер | 6,5 | 35,6217 | 1,0033 | 36,6250 | 36,6151 | 1,00 |
| 8 | 19 | 4 | N 51.721153°, E 102.215404° | 104, оз. Асанур | 3 | 45,5613 | 1,0035 | 46,5648 | 46,5516 | 1,33 |
| 9 | | 15 | | 104, оз. Асанур | 8 | 41,9341 | 1,0020 | 42,9361 | 42,9262 | 1,00 |
| 10 | | 11 | | 104, оз. Асанур | 13 | 34,2217 | 1,0006 | 35,2223 | 35,2086 | 1,39 |
| 11 | 13 | 23 | N 51.588865°, E 102.332334° | болото, «Хонгор-Уула» | 0-3 | 41,1292 | 1,0016 | 42,1308 | 42,0428 | 9,63 |
| 12 | | 1 | | болото, «Хонгор-Уула» | 13 | 39,0030 | 1,0052 | 40,0082 | 39,9318 | 8,23 |
| 13 | | 16 | | болото, «Хонгор-Уула» | 23 | 25,7812 | 1,0029 | 26,7841 | 26,7086 | 8,14 |
| 14 | 11 | 17 | N 51.713424°, E 101.567065° | Желудочный источник «Хонгор-Уула» | 0-3 | 25,6768 | 1,0030 | 26,6798 | 26,6189 | 6,46 |
| 15 | | 20 | | Желудочный источник «Хонгор-Уула» | 10 | 41,4915 | 1,0027 | 42,4942 | 42,4790 | 1,54 |

Продолжение таблицы 6

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|--------------------------------|--------------------------------------|-----|---------|--------|---------|---------|------|
| 16 | | 9 | | Желудочный источник «Хонгор-Уула» | 18 | 33,1465 | 1,0008 | 34,1473 | 34,1254 | 2,24 |
| 17 | 4 | 18 | N 51.706363°, E 101.633631° | оз. Гурокше-Нур | 5 | 46,8005 | 1,0039 | 47,8044 | 47,7758 | 2,93 |
| 18 | 15 | 14 | N 51.765797°, E 102.438165° | оз. Енгаргинсоке | 1-5 | 38,1474 | 1,0019 | 39,1493 | 39,0832 | 7,06 |
| 19 | 20 | 10 | N 51.72517° E 102.2210° | оз. Синти | 7 | 48,6494 | 1,0020 | 49,6514 | 49,6424 | 0,91 |
| 20 | | 6 | | оз. Синти | 17 | 44,5995 | 1,0030 | 45,6147 | 45,6125 | 0,22 |
| 21 | | 12 | | оз. Синти | 22 | 51,5455 | 1,0004 | 52,5459 | 52,5361 | 0,99 |
| 22 | 16 | 3 | N 51,766363°, E 102,441486° | оз. Шоршонка | 0-3 | 47,5107 | 1,0022 | 48,5129 | 48,4394 | 7,91 |
| 23 | | 24 | | оз. Шоршонка | 7 | 38,4426 | 1,0023 | 39,4449 | 39,3646 | 8,71 |
| 24 | 10 | 21 | N 51.913781°, E 102.673229° | старица оз. Окинское | 3 | 40,7400 | 1,0017 | 41,7417 | 41,6712 | 7,57 |
| 25 | | 19 | | старица оз. Окинское | 13 | 40,8523 | 1,0013 | 41,8536 | 41,7820 | 7,70 |

5.6 Растворенное окрашенное органическое вещество в воде водных объектов

В таблице 7 представлены результаты коэффициента наклона и поглощения, значения абсорбции отобранных проб.

Ямало-Ненецкий автономный округ. Для водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм составила от 0,23 до 23,39 нм^{-1} . Максимальное значение было измерено для поймы р. Полуй, расположенной на территории г. Салехард (точка 106); минимальное – зарастающий пруд в г. Салехард (точка 102). Значение спектрального угла наклона S колеблется в диапазоне от 0,009 до 0,020 нм^{-1} . Однако величины меньше 0,014 нм^{-1} оказывают преобладание наличия аллохтонного растворенного органического вещества, поступающего в водоёмы извне. Данные значения были отмечены на точке 102.

Максимальный коэффициент уклона (S_r) составил 1,46 (102, зарастающий пруд г. Салехард), что превышает типичное значение для пресных вод и говорит о фотодеградационности водного объекта. Данный водный объект испытывает определенную антропогенную нагрузку. На термокарстовом озере (точка 103) $S_r \sim 1,2$. На остальных точках значение коэффициента не превышало значения для пресных вод, что указывает на поступление в эти озера свежих богатых гуминовыми кислотами наземных органических материй. Минимальный коэффициент уклона S_r составил 0,07 (106, пойма р. Полуй г. Салехард), что относит пробу к типу вод содержащих свежее органическое вещество богатых гуминовыми кислотами.

Для водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа значение $\alpha\text{ОРОВ}$ (440) в среднем равно 6,76 нм^{-1} . ОРОВ во всех объектах данного региона по основному источнику поступления является автохтонным ($S > 0,02 \text{ нм}^{-1}$). Выявлено, что воды большинства водных объектов насыщены поступающими с земной поверхности органическими веществами и гуминовыми кислотами ($S_r < 1,2$).

Тункинский парк (Республика Бурятия). На территории парка абсорбция ОРОВ на длине волны 440 нм составила от 0,50 до 7,19 нм^{-1} . Максимальное значение было измерено для болота на территории источников «Хонгор-Уула» (точка 13); минимальное – Желудочный источник на территории указанного рекреационного центра (точка 11).

Значение спектрального угла наклона S колеблется в диапазоне от 0,013 до 0,018 нм^{-1} . Минимальное значение характерно для оз. Шоршонка (точка 16), что свидетельствует о поступлении в озеро терригенных (аллохтонных) веществ. В остальных водных объектах величины являются типичными для пресноводных водоемов.

Максимальный коэффициент уклона (S_r) составил 1,54 (оз. Шоршонка), что превышает типичное значение для пресных вод и говорит о фотодеградационности водного

объекта. На остальных точках значение коэффициента не превышало значения для пресных вод, что указывает на поступление в эти озера свежих богатых гуминовыми кислотами наземных органических материи. Минимальный коэффициент уклона S_r составил 0,43 (Глазной источник, точка 12), что относит пробу к типу вод содержащих свежее органическое вещество богатых гуминовыми кислотами.

В водных объектах Тункинского парка среднее значение $\alpha_{\text{ОРОВ}}(440)$ составило $2,86 \text{ нм}^{-1}$. Характерно преобладание автохтонного ОРОВ ($S > 0,02 \text{ нм}^{-1}$). Воды рассмотренных объектов богаты гуминовыми кислотами и поступающими с поверхности водосборов органическими веществами ($S_r < 1,2$), исключение составляет оз. Шоршонка со значением 1,54.

Таблица 7

Значения параметров ОРОВ для α ОРОВ(440), S (300-500), коэффициента уклона (Sr) и типы коэффициента уклона для водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа и Тункинского парка (Республика Бурятия)

| № п/п | № на схеме | Место отбора проб | α CDOM (440) нм^{-1} | S (300-500) нм^{-1} | Коэффициент наклона Sr (S (УФ)/ S (видимый)) | Тип коэффициента наклона Sr |
|-------|------------|---|--------------------------------------|------------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | 14 | р. Иркут, п. Вышка | 0,91 | 0,015 | 0,98 | <1,2 |
| 2 | 4 | оз, Гурокшэ-Нур | 2,09 | 0,017 | 1,07 | <1,2 |
| 3 | 11 | Желудочный источник, «Хонгор-Уула» | 0,50 | 0,014 | 1,09 | <1,2 |
| 4 | 6 | р. Ихе-Ухгунь | 0,97 | 0,015 | 0,84 | <1,2 |
| 5 | 8 | пойма р. Сусер | 2,26 | 0,018 | 1,08 | <1,2 |
| 6 | 15 | оз. Енгаргинское | 4,44 | 0,018 | 0,89 | <1,2 |
| 7 | 9 | оз. Окинское | 3,33 | 0,017 | 0,96 | <1,2 |
| 8 | 5 | приток реки р. Ихе-Ухгунь, с. Хойто-Гол | 0,72 | 0,015 | 0,98 | <1,2 |
| 9 | 12 | Глазной источник, «Хонгор-Уула» | 4,85 | 0,016 | 0,43 | <1,2 |
| 10 | 16 | оз. Шоршонка | 4,22 | 0,013 | 1,54 | >1,2 |
| 11 | 13 | болото у источников, «Хонгор-Уула» | 7,19 | 0,016 | 0,78 | <1,2 |
| 12 | – | Озеро около пинго | 2,91 | 0,017 | 0,93 | <1,2 |
| 13 | – | Озеро Лебяжье | 2,00 | 0,020 | 0,83 | <1,2 |
| 14 | 101 | озеро в г. Салехард, Ямал | 5,29 | 0,018 | 0,71 | <1,2 |

Продолжение таблицы 7

| | | | | | | |
|----|-----|---|-------|-------|------|------|
| 15 | 102 | зарастающий пруд в г. Салехард, Ямал | 0,23 | 0,009 | 1,46 | >1,2 |
| 16 | 103 | термокарстовое озеро на карбоновом полигоне, Ямал | 10,16 | 0,015 | 1,00 | <1,2 |
| 17 | 104 | озеро на карбоновом полигоне, Ямал | 1,96 | 0,016 | 1,18 | ~1,2 |
| 18 | – | перигляциальное озеро (ледник Романтиков), Ямал | 6,08 | 0,016 | 0,80 | <1,2 |
| 19 | 105 | протока Вылпосл, г. Лабытнанги, Ямал | 8,83 | 0,018 | 0,79 | <1,2 |
| 20 | 106 | пойма р. Полуй в г. Салехард, Ямал | 23,39 | 0,017 | 0,07 | <1,2 |

Примечание: зеленый оттенок – преобладает аллохтонное органическое вещество; голубой оттенок свидетельствует о фотодеградациии в водном объекте; желтый оттенок – измерения Ямала, синие – измерения Тункинского парка

5.7 Изотопный состав вод

Ямало-Ненецкий автономный округ. Первое представление об изотопном составе атмосферных осадков Ямала получены из базы данных глобальной сети изотопов в атмосферных осадках (GNIP). В таблице 8 представлены данные GNIP со станции Салехард (ЯНАО). Проект GNIP, данные измерений температуры, количества осадков, измерение изотопного состава с 1996–2000 гг.

Таблица 8

Изотопный состав атмосферных осадков, температура воздуха и количество осадков с 1996–2000 г. по ст. Салехард усредненные по месяцам (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>)

| Месяц | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | Температура воздуха, °С | Количество осадков, мм |
|----------|---------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Январь | $-24,44 \pm 2,97$ | $-193,9 \pm 22,5$ | -24,9 | 20,4 |
| Февраль | $-22,35 \pm 1,77$ | $-175,2 \pm 14,2$ | -23,9 | 22,1 |
| Март | $-18,30 \pm 1,88$ | $-147,5 \pm 13,8$ | -16,6 | 18,6 |
| Апрель | $-19,06 \pm 4,10$ | $-148,5 \pm 32,5$ | -8,4 | 28,9 |
| Май | $-14,20 \pm 2,19$ | $-106,4 \pm 17,7$ | -1,1 | 34,3 |
| Июнь | $-11,74 \pm 1,81$ | $-93,2 \pm 13,7$ | 8,3 | 45,3 |
| Июль | $-10,12 \pm 1,86$ | $-80,3 \pm 13,8$ | 14 | 61,6 |
| Август | $-13,18 \pm 0,68$ | $-100,1 \pm 6,0$ | 11 | 70,2 |
| Сентябрь | $-13,35 \pm 1,71$ | $-102,4 \pm 11,1$ | 5,3 | 45,6 |
| Октябрь | $-18,38 \pm 2,79$ | $-140,0 \pm 23,1$ | -5,3 | 40,6 |
| Ноябрь | $-21,76 \pm 5,22$ | $-168,9 \pm 41,4$ | -14,7 | 28,3 |
| Декабрь | $-23,04 \pm 4,28$ | $-179,3 \pm 30,3$ | -18,5 | 29,8 |

Линия метеорных вод в г. Салехард по табличным данным имеет вид: $\delta^2\text{H} = 7,9 \times \delta^{18}\text{O} + 2,5 \text{ ‰}$ ($R^2 = 1$). Значения изотопного состава находились в пределах $\delta^{18}\text{O} = -10,12 \text{ ‰} \dots -24,44 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -80,3 \dots -193,9 \text{ ‰}$. Минимальное количество осадков отмечалось в период с января по март, максимальное – с июля по август.

В таблице 9 представлены результаты изотопного состава воды, отобранной во время летней практики в 2022 г. на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Измеренные изотопные составы находились $\delta^{18}\text{O} -11,08 \text{ ‰} \dots -15,87 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -95,0 \text{ ‰} \dots -114,0 \text{ ‰}$; на территории г. Салехард $\delta^{18}\text{O} 11,56 \text{ ‰} \dots -13,48 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -98,3 \text{ ‰} \dots -108,0 \text{ ‰}$.

Таблица 9

Изотопные значения для вод Ямало-Ненецкого автономного округа

| № пп | Место отбора | Дата отбора | N | E | Sample ID | Температура, °С | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | d_{ex} , ‰ |
|------|---|-------------|------------|------------|-----------|-----------------|---------------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | Озеро около пинго | 18.07.2022 | 66.470263° | 67.514228° | Ямал | 24,6 | -13,95 | -104,5 | 7,1 |
| 2 | Озеро Лебяжье | 19.07.2022 | 66.533584° | 66.654556° | Ямал | 23,3 | -11,71 | -98,3 | -4,62 |
| 3 | Озеро в г. Салехард | 19.07.2022 | 66.530859° | 66.660624° | 101, Ямал | 23,4 | -11,56 | -103,9 | -11,42 |
| 4 | Зарастающий пруд в г. Салехард | 19.07.2022 | 66.530859° | 66.660624° | 102, Ямал | 19,7 | -13,48 | -108,0 | -0,16 |
| 5 | Термокарстовое озеро на карбоновом полигоне | 20.07.2022 | 66.710648° | 66.349038° | 103, Ямал | 19,3 | -11,90 | -100,4 | -5,2 |
| 6 | Озеро на карбоновом полигоне | 20.07.2022 | 66.711574° | 66.344275° | 104, Ямал | 21,0 | -11,08 | -95,0 | -6,36 |
| 7 | Перигляциальное озеро (ледник Романтиков) | 21.07.2022 | 66.899717° | 65.435800° | Ямал | 9,1 | -15,87 | -114,0 | 12,96 |
| 8 | Протока Вылпосл, г. Лабытнанги | 22.07.2022 | 66.654697° | 66.418886° | 105, Ямал | 19,5 | -14,42 | -111,0 | 4,36 |
| 9 | Пойма р. Полуи г. Салехард | 22.07.2022 | 66.527509° | 66.585286° | 106, Ямал | 19,8 | -11,72 | -102,3 | -8,54 |

На рисунке 25 представлен изотопный состав вод Ямало-Ненецкого автономного округа в сравнении с линией метеорных вод г. Салехард (Проект GNIP, 1996-2000 г.).

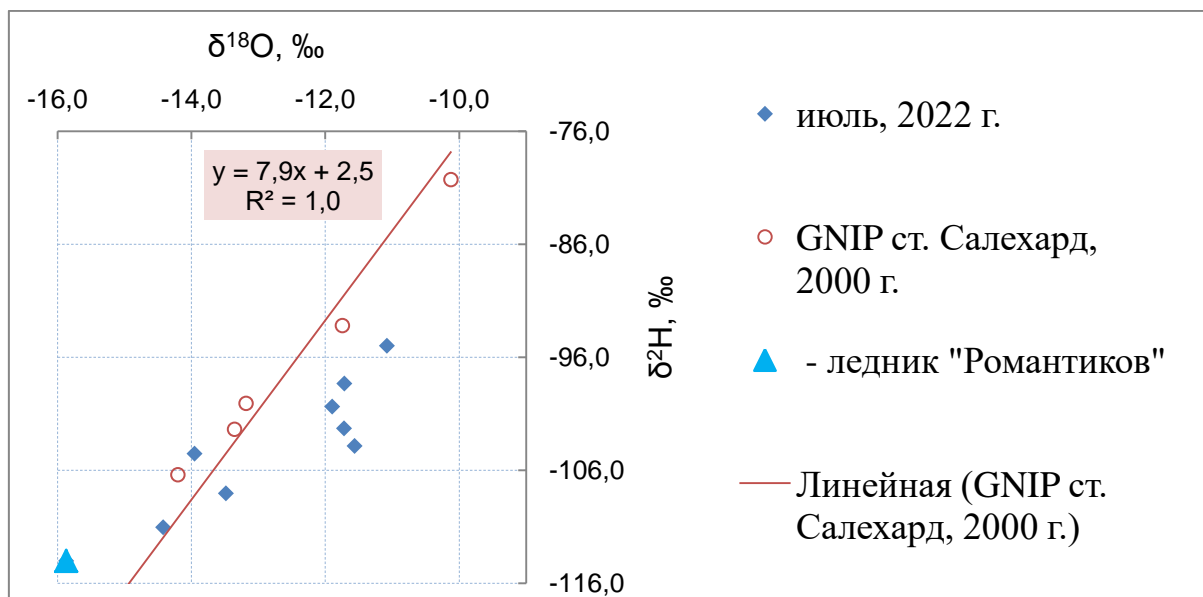


Рисунок 25 – Изотопный состав вод Ямало-Ненецкого автономного округа на 2022 г. в сравнении с линией метеорных вод г. Салехард 1996–2000 г. (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>)

Сравнивая уравнение регрессии (красная линия) с точками отбора можно отметить, что вода в пробах пополняется преимущественно за счет дождевых осадков. Такое наблюдение и отмечается по значению дейтериевого эксцесса (таблица 9), где значения d_{ex} колеблются от +7,10 ‰...-11,42 ‰, что значительно ниже 10 ‰, исключение составляет перигляциальное озеро, где $d_{ex} = 12,96$ ‰ (Деревягин и др., 2003).

У пробы воды отобранной с поверхности перигляциального озера (ледник Романтиков) значение $d_{ex} = 12,96$ ‰, что характерно для талых снеговых вод (Деревягин и др., 2003). Изотопический состав по GNIP схож со значениями изотопического состава вод за период март-апрель. Скорее всего, основным источником изотопов является сам ледник Романтиков в результате его деградации, который в свою очередь формируется в основном за счет паров воды, образованных в речных долинах ближайших территорий.

На озере в г. Салехард (точка 101) вода имеет более «тяжелый» изотопический состав (медленное обновление вод) – это может связано с тем, что ранее на месте был песчаный карьер, поэтому его пополнение скорее связано с подземными водами. Также в г. Салехард по изотопному составу выделяется зарастающий пруд на точке 102, он имеет «легкий» изотопический состав, несмотря на то, что объект находился недалеко от автодороги, что способствует увеличению испаряемости с ближайших территорий. Скорее данный объект является непроточным и пополняется исключительно за счет дождевых

вод. Точки имеют отрицательные значения d_{ex} (таблица 9), что указывает на процесс активного испарения (Деревягин и др., 2003).

Отдельно выделяется озеро около пинго. Изотопный состав здесь характерен для периода с отрицательными температурами. Это свидетельствует о том, что основным источником поступления вод является деградирующая мерзлота, в частности сам пинго. Остальные точки по изотопному составу характерны для летнего периода года (проект GNIP).

Тункинский парк (Республика Бурятия). Наблюдения за изотопным составом атмосферных осадков непосредственно на территории Тункинского парка не производятся, поэтому в качестве сравнения используется ближайшая определенная станция в г. Иркутск (данные GNIP).

В таблице 10 представлены данные со станции Иркутск (Иркутская область). Проект GNIP, данные измерений температуры, количества осадков и измерение изотопного состава проводились с 2011–2017 гг.

Таблица 10

Данные изотопного состава усредненные по месяцам, температура воздуха и количество осадков с 2011-2017 г. ст. Иркутск (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>)

| Месяц | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | Температура воздуха, °C | Количество осадков, мм |
|----------|---------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Январь | $-29,98 \pm 2,34$ | $-232,1 \pm 21,8$ | -19,2 | 13,8 |
| Февраль | $-27,00 \pm 2,08$ | $-214,8 \pm 21,4$ | -15,1 | 12,6 |
| Март | $-21,78 \pm 3,43$ | $-168,6 \pm 31,5$ | -5,1 | 8 |
| Апрель | $-15,33 \pm 3,94$ | $-113,3 \pm 27,9$ | 4 | 14,4 |
| Май | $-13,30 \pm 2,88$ | $-104,0 \pm 19,8$ | 9,6 | 42,7 |
| Июнь | $-12,68 \pm 1,70$ | $-102,7 \pm 7,4$ | 16,6 | 41,9 |
| Июль | $-11,04 \pm 1,56$ | $-84,6 \pm 17,7$ | 18,4 | 101,1 |
| Август | $-12,06 \pm 1,33$ | $-90,0 \pm 6,6$ | 16,4 | 88,7 |
| Сентябрь | $-14,94 \pm 1,22$ | $-113,9 \pm 8,4$ | 9,2 | 40,7 |
| Октябрь | $-22,34 \pm 6,09$ | $-166,9 \pm 46,1$ | 0,6 | 22,8 |
| Ноябрь | $-25,38 \pm 4,25$ | $-192,6 \pm 29,1$ | -11,4 | 22,6 |
| Декабрь | $-28,78 \pm 3,85$ | $-221,0 \pm 26,2$ | -15,8 | 19,5 |

Линия метеорных вод в г. Иркутск по табличным данным имеет вид: $\delta^2\text{H} = 7,8 \times \delta^{18}\text{O} + 1,4 \text{‰}$ ($R^2 = 1$). Результаты значений находились $\delta^{18}\text{O} = -11,04 \text{‰} \dots -29,98 \text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -84,6 \text{‰} \dots -232,1 \text{‰}$. Минимальное количество осадков отмечалось – с марта по апрель, максимальное – с июля по август. Пик отрицательной температуры приходится на январь – $-19,2 \text{ °C}$, положительной на июль – $+18,4 \text{ °C}$.

В таблице 11 представлены результаты изотопного состава воды, отобранной во время летней практики в 2022 г. в Тункинском национальном парке. Результаты значений находились $\delta^{18}\text{O} = -4,67 \text{‰} \dots -16,52 \text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -61,6 \text{‰} \dots -122,8 \text{‰}$.

Таблица 11

Изотопные значения для вод Тункинского парка

| № | № на схеме | № пп | Место отбора | Дата отбора | N | E | Sample ID | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | dex, ‰ |
|----|------------|------|---|-------------|------------|-------------|-----------|---------------------------|------------------------|--------|
| 1 | 4 | 6 | оз. Гурокшэ-Нур | 05.08.2022 | 51.706363° | 101.633631° | ТП* | -12,26 | -97,7 | 0,38 |
| 2 | 5 | 9 | приток реки р. Ихе-Ухгунь, с. Хойто-Гол | 06.08.2022 | 51.713424° | 101.655393° | 101, ТП | -14,79 | -108,3 | 10,02 |
| 3 | 6 | 8 | р. Ихе-Ухгунь | 06.08.2022 | 51.704184° | 101.655393° | ТП | -14,54 | -106,3 | 10,02 |
| 4 | 8 | 15 | пойма р. Сусер | 08.08.2022 | 51.910543° | 101.743884° | 103, ТП | -8,31 | -78,3 | -11,82 |
| 5 | 9 | 16 | оз. Окинское | 08.08.2022 | 51.912749° | 100.668085° | ТП | -12,32 | -96,6 | 1,96 |
| 6 | 11 | 19 | Желудочный источник, «Хонгор-Уула» | 11.08.2022 | 51.601333° | 102.359083° | ТП | -14,30 | -105,9 | 8,5 |
| 7 | 12 | 21 | Глазной источник, «Хонгор-Уула» | 13.08.2022 | 51.600245° | 102.360232° | ТП | -14,32 | -105,8 | 8,76 |
| 8 | 13 | 23 | болото у источников, «Хонгор-Уула» | 11.08.2022 | 51.588865° | 102.332334° | ТП | -13,66 | -100,0 | 9,28 |
| 9 | 14 | 29 | р. Иркут, п. Вышка | 11.08.2022 | 51.714273° | 102.430685° | ТП | -14,46 | -106,4 | 9,28 |
| 10 | 15 | 30 | оз. Енгаргинское | 12.08.2022 | 51.765797° | 102.438165° | ТП | -13,67 | -103,2 | 6,16 |
| 11 | 16 | 33 | оз. Шоршонка | 12.08.2022 | 51.765797° | 102.438165° | ТП | -4,67 | -61,6 | -24,24 |
| 12 | 17 | 40 | источник «Субурга» | 16.08.2022 | 51.90770° | 102.34779° | ТП | -16,52 | -122,8 | 9,36 |
| 13 | 18 | 41 | источник «Папий» | 16.08.2022 | 51.88879° | 102.30461° | ТП | -15,59 | -115,0 | 9,72 |
| 14 | 19 | 43 | оз. Асанур | 17.08.2022 | 51.72113° | 102.21543° | 104, ТП | -13,11 | -101,8 | 3,08 |
| 15 | 22 | 46 | оз. Шостахол | 18.08.2022 | 51.76437° | 102.47084° | ТП | -4,94 | -63,1 | -23,58 |

ТП* – Тункинский парк, Республика Бурятия

На рисунке 26 представлен изотопный состав вод Тункинского парка в сравнении с линией метеорных вод г. Иркутск (Проект GNIP).

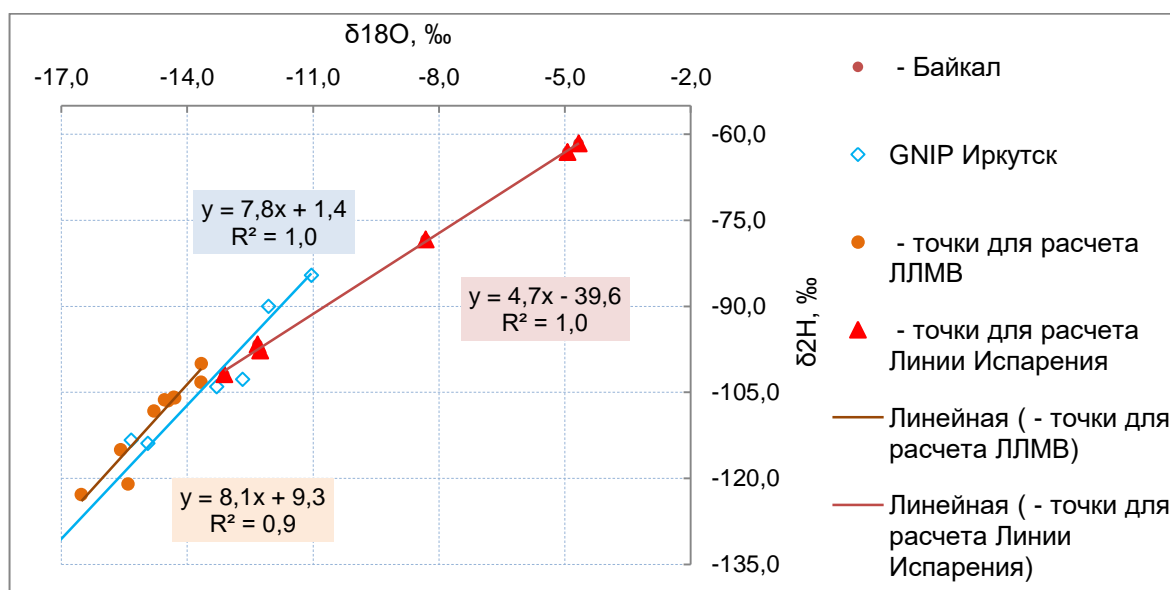


Рисунок 26 – Изотопный состав вод Тункинского парка на 2022 г. в сравнении с линией метеорных вод г. Иркутск 2011-2017 г. (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>)

Рассчитанная локальная линия метеорных вод атмосферных осадков на территории Тункинского парка описывается уравнением: $\delta^2\text{H} = 8,1 \times \delta^{18}\text{O} + 9,3 \text{ ‰}$ ($R^2 = 0,9$) и для линии испарения $\delta^2\text{H} = 4,7 \times \delta^{18}\text{O} - 39,6 \text{ ‰}$ ($R^2 = 1$).

По территории Тункинского парка преобладание «тяжелых» изотопов было отмечено на пойме р. Сусер (Окинское плато, точка 8), оз. Шоршонка (точка 16), оз. Шостахол (точка 22). Это свидетельствует о том, что здесь пополнение воды происходит преимущественно, подстилающей данные озера, островной мерзлоты, и данные водные объекты являются непроточными (плохое перемешивание вод), так как изотопический состав достигает ничтожно малых значений, не характерных для данной территории. Точки также имеют отрицательные значения d_{ex} (таблица 11), что указывает на процесс активного испарения в летний период.

На источнике Папий (точка 18) изотопный состав вод характерен для периода года с переходными температурами для данного района (март). На источнике была указана информационная табличка о происхождении источника в результате термокарста (рисунок 27).



Рисунок 27 – Информационная табличка у источника «Папий» (а), сам источник (б) п. Аршан, август 2022 г. (фотография – Анна Шорникова)

Существование талика под озером, исходя из изотопного анализа, возможно. Так как увеличение «легких» изотопов происходит за счет талой воды, а не за счет интенсивного испарения (значение $d_{ex} > 0$) (Деревягин и др., 2003). На источнике «Субборга» также отмечено преобладание «легких» изотопов. Источник представляет ручей, выходящий многими рукавами на небольшой площадке склона Тункинских гольцов в 3 км (Национальный парк «Тункинский», 2023). В данном случае на изотопный состав может влиять снеговая вода со склона. Остальные точки по изотопному составу характерны для летнего периода года на исследуемой территории (проект GNIP).

На рисунке 28 представлены результаты значений изотопного состава вод Ямало-Ненецкого автономного округа и Тункинского парка в сравнении с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ).

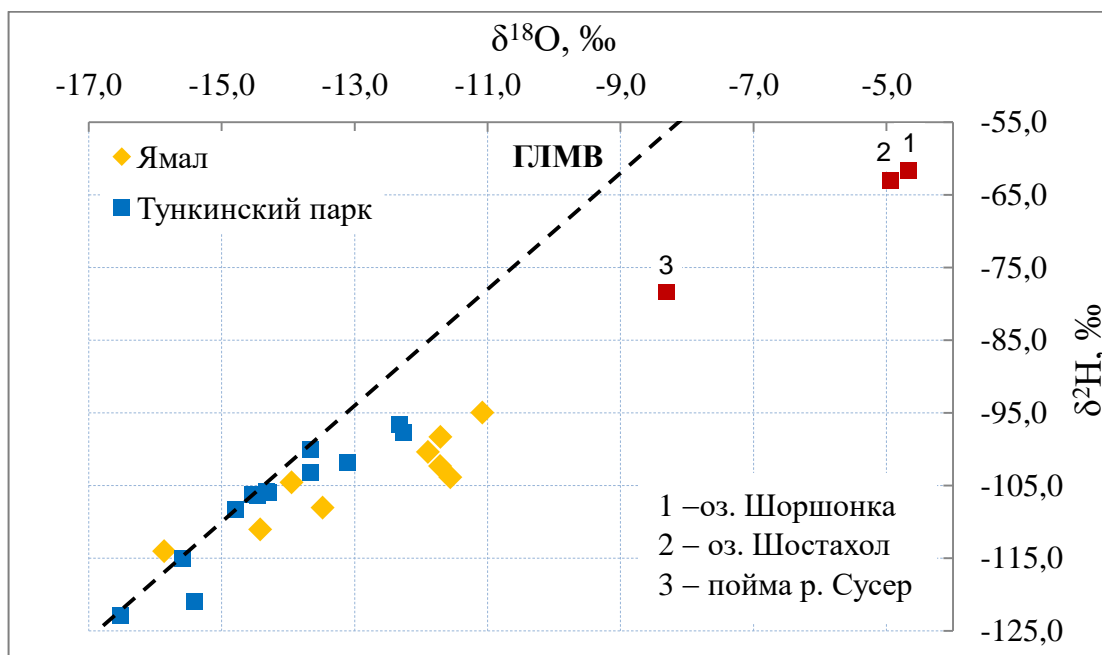


Рисунок 28 – Изотопный состав вод Ямала и Тункинского парка на 2022 г. в сравнении с глобальной линией метеорных вод (Craig, 1961)

Из рисунка 28 стоит отметить, что значения изотопного состава вод Ямала расположены левее ГЛМВ, что говорит о преобладании активного испарительного процесса. В среднем результаты значений составили $\delta^{18}\text{O} = -12,85 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -104,2 \text{ ‰}$, что по проекту GNIP (таблица 8) характерно для периода май-июнь. В среднем увеличение «легких» изотопов в летний период говорит о том, что помимо дождевых осадков в процессе «обновления» изотопного состава вод, свой вклад вносят талые воды округа.

Процесс активного испарения характерен и для ряда точек Тункинского парка. Особо выделяются точки озер Шоршонка и Шостахол, пойма р. Сусер, что свидетельствует о том, что данные водные объекты пополняются преимущественно за счет деградации островной мерзлоты и являются непроточными ($d_{ex} \ll 10 \text{ ‰}$). Но большинство точек отбора лежит на ГЛМВ или расположены рядом, что соответствует летнему изотопическому составу вод на исследуемой территории. Средние результаты значений составили $\delta^{18}\text{O} = -12,68 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -99,6 \text{ ‰}$, что соответствует локальному составу метеорных вод для летнего периода (таблица 10).

5.8 Корреляционный анализ параметров водных экосистем

В таблице 12 представлены результаты анализа связи между определяемыми параметрами отобранных проб воды.

Из корреляционной матрицы стоит отметить:

- 1) Все параметры за исключением коэффициента наклона S_r (характеризует процесс фотодегградации) имеют высокую или среднюю степень взаимосвязи с растворенным в воде кислородом, что указывает на то, что процесс фотодегградации косвенно зависит от данного параметра (Porcal et al., 2014). При этом, с нитратами, нитритами и кремнием растворенный кислород имеет отрицательную (обратную) связь, так как при образовании данных биогенных элементов происходит процесс окисления, который сопровождается поглощением растворенного кислорода.
- 2) Аммоний имеет высокую взаимосвязь с нитритами и нитратами. Это характерно, так как именно процессы биоокисления аммиака до нитритов, а нитритов до нитратов являются энергодающими для обеспечения роста нитрифицирующих бактерий (Семенова, Сироткин, 2008).
- 3) При проведении корреляции была выделена прямая зависимость нитритов от спектрального угла наклона S (отвечает за преобладание автохтонного или аллохтонного органического вещества). Представители автохтонной микрофлоры лучше выявляются, так как нитрит ингибирует рост бациллярных форм, подавляющих

микроорганизмы аллохтонной группы (Старых, Зарянова, 2014). Что подтверждает полученный результат.

- 4) Установлена обратная связь между кремнием и рН, кремнием и температурой воды. Так как при увеличении рН и роста температуры усиливается миграция кремния (Камбалина, Скворцова и др., 2013).
- 5) Также из корреляционной матрицы стоит отметить связь изотопа кислорода-18 от температуры воды. На рисунке 29 показаны зависимости $\delta^{18}\text{O}$ от температуры для Ямала и Тункинского парка.

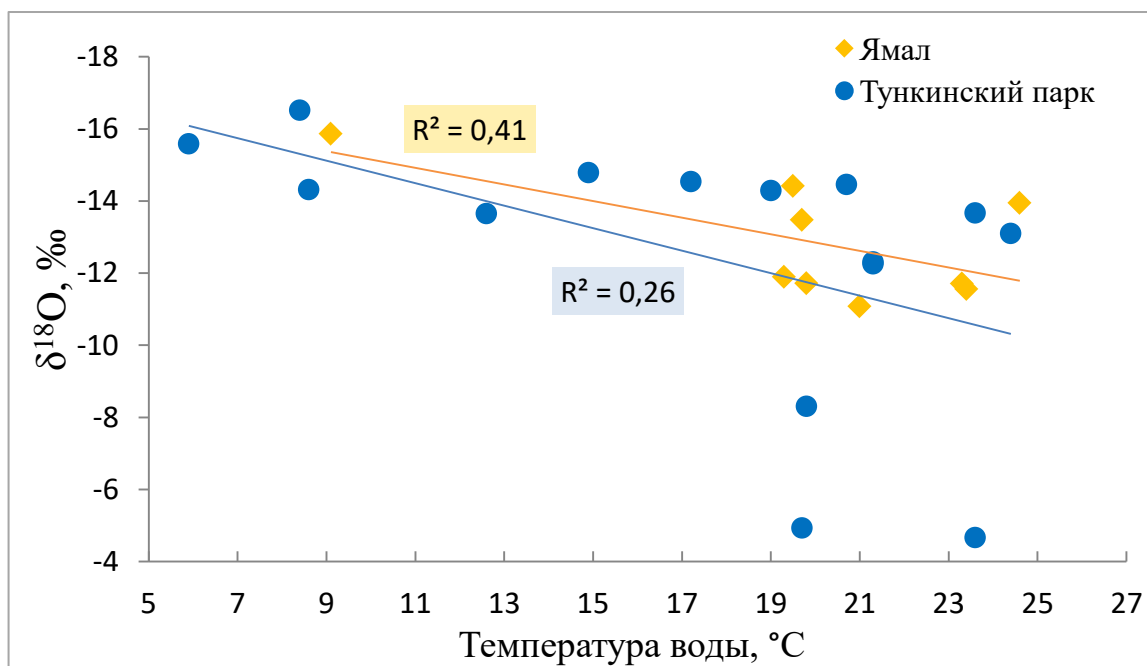


Рисунок 29 – Зависимость относительной концентрации $\delta^{18}\text{O}$ от температуры воды в точке отбора проб: синие точки – Ямал, зеленые точки – Тункинский парк

Из рисунка видно, что коэффициент корреляции между значениями $\delta^{18}\text{O}$ и температурой воды для Ямала составляет 0,41 (умеренная положительная связь); связь между этими величинами выражается уравнением: $\delta^{18}\text{O} = 0,23t - 17,46$. В случае с Тункинским парком коэффициент корреляции равен 0,26, что свидетельствует об отсутствии связи между температурой воды и изотопным составом. Эти зависимости обусловлены множеством разных факторов и характеризуются рядом закономерностей, в частности от направления ветра и площади распространения мерзлоты (Скакун и др., 2020).

- б) Прямая зависимость отмечается у потока метана с изотопным составом вод, при этом влияние оказывают как изотопы кислорода $\delta^{18}\text{O}$, так и изотопы водорода $\delta^2\text{H}$ (таблица 12, рисунок 30).

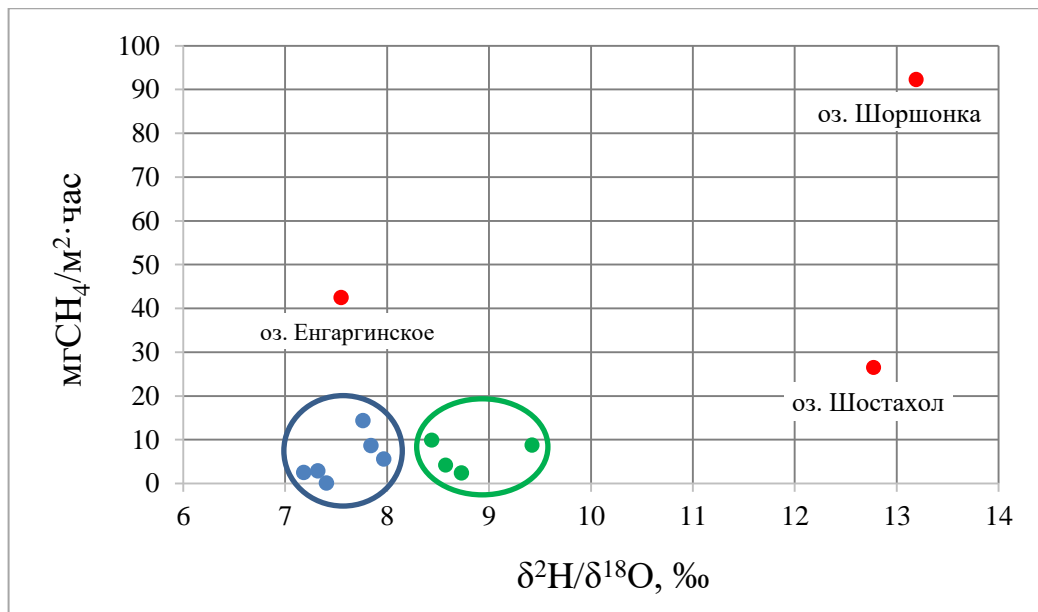


Рисунок 30 – Зависимость потока метана от изотопного состава вод

Из рисунка видно, что отмечаются группы точек, с характерными схожими параметрами. Отличие между точками составляет рассчитанное значение дейтериевого эксцесса (d_{ex} , ‰). Синие точки имеют его разброс 0,38 ‰...12,96 ‰, зеленые – -5,2 ‰...-11,82 ‰. Большая часть точек имеет значения $d_{\text{ex}} < 10$ ‰, что свидетельствует влиянии на изотопный состав вод испарительного фракционирования (Папина, Малыгина и др., 2017). Преобладание потока метана устанавливается при отношении изотопов, находящихся в промежутке с 7 ‰...9 ‰. Озера Шоршонка и Шостахол расположены на территории Койморских болот и имеют более «легкий» изотопический состав, что может свидетельствовать о питании талыми водами подстилающей островной мерзлоты или на изотопный состав вод оказывает влияние грунтовых минеральных вод (Кислов, 1999).

- 7) Выявлена обратная зависимость потока метана от спектрального угла наклона S (300-500). При уменьшении параметра S менее $0,014 \text{ nm}^{-1}$, начинает преобладать аллохтонное органическое вещество, что может способствовать увеличению первичной продукции и увеличению потока детрита на дно, что в свою очередь является источником метана, что указывает на прямую зависимость между трофическим статусом водоема и эмиссией метана (Deemer at al., 2016).
- 8) Коэффициент угла наклона S_g , показывающий на наличие процесс фотодеградаци, и поток метана имеют умеренную положительную связь, что может сказаться на выбросах потока метана. При увеличении S_g в поверхностном слое воды происходит преобразование растворенного в воде кислорода, что может привести к увеличению потока метана в атмосферу (Гречушников, Школьный, 2019).

Таблица 12

Корреляционная матрица

| | аммоний, мг/л | нитраты, мг/л | нитриты, мг/л | кремний, мг/л | Поток метана | S (300-500) спектральный угол наклона | Коэффициент угла наклона Sr | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | pH | t, °C | Концентрация кислорода, мг/л | Общая минерализация мг/л |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|---|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| аммоний, мг/л | 1 | | | | | | | | | | | | |
| нитраты, мг/л | 0,51 | 1 | | | | | | | | | | | |
| нитриты, мг/л | 0,72 | 0,69 | 1 | | | | | | | | | | |
| кремний, мг/л | -0,03 | -0,41 | -0,54 | 1 | | | | | | | | | |
| Поток метана | -0,03 | -0,03 | -0,19 | -0,39 | 1 | | | | | | | | |
| S (300-500) спектральный угол наклона | 0,31 | 0,54 | 0,79 | -0,37 | -0,42 | 1 | | | | | | | |
| Коэффициент угла наклона Sr | -0,12 | -0,42 | -0,21 | -0,36 | 0,52 | -0,44 | 1 | | | | | | |
| $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | 0,07 | -0,16 | 0,16 | -0,57 | 0,69 | -0,12 | 0,45 | 1 | | | | | |
| $\delta^2\text{H}$, ‰ | 0,11 | -0,16 | 0,14 | -0,54 | 0,72 | -0,46 | 0,56 | 0,98 | 1 | | | | |
| pH | -0,33 | -0,05 | -0,07 | -0,78 | 0,23 | 0,30 | 0,04 | 0,42 | 0,43 | 1 | | | |
| t, °C | 0,01 | -0,10 | 0,09 | -0,62 | 0,39 | 0,09 | 0,32 | 0,52 | 0,47 | 0,28 | 1 | | |
| Концентрация кислорода, мг/л | 0,72 | -0,58 | -0,60 | -0,57 | 0,96 | 0,85 | 0,05 | 0,83 | 0,78 | 0,60 | 0,54 | 1 | |
| Общая минерализация пресн., мг/л | -0,12 | 0,49 | 0,43 | -0,63 | 0,36 | 0,07 | 0,47 | 0,07 | -0,03 | -0,23 | 0,06 | 0,04 | 1 |

Примечание: желтый оттенок – выявлена прямая корреляционная зависимость между значениями, синий – обратная (отрицательные значения) корреляционная зависимость

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным источникам суммарный поток эмиссии метана на территории распространения многолетней и островной мерзлоты оценивается от 21 до 8000 Мт CH_4 /год, такой колоссальный разброс связан с разными методиками расчетов, с местом измерения потока, годом исследования. При этом из естественных источников в атмосферу попадает, по разным оценкам, от 218 Мт...384 Мт CH_4 . Среди них наиболее интенсивен поток метана с поверхности заболоченных территорий, составляющий до 80 %. Вклад антропогенных источников варьируется от 319 Мт...352 Мт CH_4 (данные 2000-2012 гг.). В настоящее время наиболее значительными составляющими антропогенной эмиссии метана является сельское хозяйство – до 30 % антропогенных выбросов, а также добыча и переработка нефти и газа – около 23 % (Роль метана в изменении климата, 2018).

Воды по водородному показателю на территориях исследования относятся к нейтральным водам (рН находится в промежутке от 7,0 до 8,0). По общей минерализации воды относятся к категории вод с относительно повышенной минерализацией (0,5 – 1,0 мг/л). Температура воды в среднем по Ямало-Ненецкому автономному округу выше, так как отбор проб производился с менее глубоководных объектов и более теплый период лета (июль), чем в Тункинской долине (август).

По концентрации биогенных элементов на территории Тункинского парка были отмечены превышения по аммонии на водных объектах, расположенных вблизи рекреационных зон и туристических маршрутов (п. Ниловка, комплекс источников Хонгор-Уула, источники п. Аршан). Связано с тем, что большинство мест не имеют оборудованных площадок для размещения туристов.

В среднем концентрация метана в донных отложениях по Ямало-Ненецкому автономном округу достигает 173,62 мг/л, на территории Тункинского парка усредненная концентрация метана в донных отложениях озер составляет 152,12 мг/л. Стоит отметить, что в зоне распространения сплошной мерзлоты эмиссия метана может увеличиться при её деградации.

По результатам лабораторных исследований величина потерь при прокаливании составляет от 0,22 % до 9,63 %, что говорит о происхождении суглинистых и глинистых фракций донных отложений в Тункинской долине, а также о невысоком содержании органического вещества в отложениях (Опекунова и др., 2015; Балыкин и др., 2019). По литературным источникам на территории Ямало-Ненецкого автономного округа указанный показатель может достигать до 90 % (Десяткин и др., 2022). Особенностью данного генезиса является наличие на данной территории распространение сплошной

многолетней мерзлоты, что способствует аккумуляции и консервации органического материала в верхних органогенных (торфяно-перегнойных) горизонтах.

По расчетам окрашенного растворенного органического вещества стоит отметить, что для территорий исследований характерно преобладание автохтонного растворенного органического вещества. Исключением являются зарастающий пруд в г. Салехард (ЯНАО) и оз. Шоршонка (Тункинский парк) на данных участках преобладают аллохтонные органические вещества, свидетельствующие о загрязнении водных объектов, а также на данных объектах отмечается процесс фотодеградаци, который может оказывать нарушение газообмена на границе вода-воздух.

По результатам изотопного анализа вод на территории Ямало-Ненецкого автономного округа преобладают процессы активного испарения, что может привести к увеличению дегазации с поверхности водных объектов. На территории Тункинского парка для большинства точек отбора проб воды (9 из 15) характерно изменение изотопного состава вод за счет деградации островной мерзлоты (в сравнении с данными GNIP). Для остальных объектов характерен процесс испарения, что обуславливается временем года проведения отбора проб (август 2022 г.).

По измеренным значениям эмиссии метана средний поток с территории Ямало-Ненецкого автономного округа составляет $4,8 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$, поток с Тункинской долины – $15,7 \text{ CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{час}$. Что свидетельствует о том, что эмиссия метана с территории островной мерзлоты более активна, чем с территории сплошной. Сравнив определяемые параметры (ОРОВ, концентрация метана в донных отложениях, изотопный состав вод) с потоками метана стоит отметить, что водные объекты, находящиеся на территории селитебных зон имеют наибольшую вероятность увеличения потока метана в случае деградации мерзлоты, чем естественные водные объекты.

При построении корреляционной матрицы была установлена прямая (положительная) связь потока метана с изотопным составом воды, с коэффициентом наклона (определение источника ОРОВ в водоеме). Это свидетельствует о том, что деградация многолетней мерзлоты может способствовать увеличению потока метана. А также процесс фотодеградаци водных объектов способствует более интенсивному потоку метана с их поверхности. Обратная (отрицательная) связь потока метана с углом наклона спектра (определение источников ОРОВ в водном объекте) говорит о влиянии роли трофического статуса водного объекта. Преобладание аллохтонного органического вещества приводит к увеличению потока детрита на дне, что способствует накоплению растворенного метана в водной толще.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.н. Федоровой Ирине Викторовне, а также Пашовкиной Анастасии Андреевне за ценные советы при подготовке выпускной квалификационной работы и предоставление оборудования и материалов для проведения полевого этапа работы. Отдельную благодарность автор выражает Правительству Ямало-Ненецкого автономного округа и руководству Тункинского национального парка за организацию полевых работ.

Также благодарность выражается коллективу лаборатории им. Отто Шмидта (ААНИИ) за предоставление возможности свободно использовать лабораторное оборудование для анализа проб воды на содержание растворенного окрашенного органического вещества. Автор благодарит Поважного Василия Владимировича за помощь и советы при проведении лабораторного анализа содержания окрашенного растворенного органического вещества на лабораторном оборудовании.

Благодарность Токареву Игорю Владимировичу сотруднику Ресурсного центра «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета за проведение лабораторных анализов изотопического состава отобранных проб, за личное консультирование при интерпретации результатов.

Благодарность коллективу учебной лаборатории физико-химического анализа Клубову Степану Максимовичу, Никулиной Анне Романовне, Васильевой Полине Сергеевне за оказание помощи и предоставление оборудования при проведении лабораторных анализов обработки проб донных отложений.

Выражается благодарность Федеральному исследовательскому центру «Карельский научный центр Российской академии наук» г. Петрозаводск за выполнение исследований на научном оборудовании Центра коллективного пользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, В. В. Об эмиссии метана в арктическом регионе / В. В. Адушкин, В. П. Кудрявцев // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 4(23). – 64 с.
2. Андрешкина, Н. И. Современное состояние равнинных и горных растительных сообществ: состав и структура (полуостров Ямал, Полярный Урал) / Н. И. Андрешкина // Вестник Томского государственного университета. Биология, № 1(21). – 2013. – С. 30-43.
3. Арктическая зона Российской Федерации. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». – Москва, 2020. – С. 275-301.
4. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа: карта, картографическое издание / Ред. кол.: Л.И. Левинзон, А.В. Артеев, С.И. Ларин и др.; Администрация ЯНАО, Тюменский государственный университет, Эколого-географический факультет – Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. – 303 с.
5. Атутов. А.А. Комплексная оценка территории Тункинского национального парка. – Улан-Удэ: Изд-во Бурят. НЦ СО РАН, 1995. – 84 с.
6. Атутова Ж.В., Макаров С.А. Природные катастрофы как фактор полихронности ландшафтной структуры Тункинской котловины // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития. Материалы международной научно-практической конференции, 2017. – С. 169-176.
7. Бабко А.К., Пятницкий И.В. Количественный анализ // гос. Издательство «Высшая школа», Москва, 1962. – с. 461.
8. Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. №3 (68). – С. 70-79.
9. Бакулин В.В., Козин В.В. География Тюменской области / В.В. Бакулин, В.В. Козин – Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1996. – 240 с.
10. Балыкин Д. Н., Ковалевская Н. М., Пузанов А. В., Тешебаева К., Ван Хейстеден Я. Результаты рекогносцировочных исследований почв и поверхностных вод территории Бованенковского нефтеконденсатного месторождения (полуостров Ямал) // Проблемы региональной экологии, 2019. – №1. – С. 111-116.
11. Белозерцева И. А., Черкашина А. А. Почвы и их использование в Тункинской котловине // Вестник российских университетов. Математика, 2013. – №3. – С. 945-949.

12. Белоусов В.М., Будэ И.Ю., Радзиминович Я.Б. Физико-географическая характеристика и проблемы экологии юго-западной ветви Байкальской рифтовой зоны: Учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2000. – 160 с.
13. Биличенко И.Н. Тункинский национальный парк: природные условия и проблемы природопользования // Вестник ИрГТУ, 2012. – №7 (66). – С. 55-59.
14. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика, №4 (36). – 2019. – С. 52-68.
15. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Дегазация земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 3 (39). – С. 6–22.
16. Василевская А. А. Влияние объектов нефтегазовой промышленности на многолетнемерзлые породы ЯНАО / А. А. Василевская // Метеорологический вестник. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 9-25.
17. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Особенности формирования климата котловин юго-западного Прибайкалья // Известия РАН. Серия географическая, 2015. – № 2. – С. 104-111.
18. Веретенникова, Е. Э. Эмиссия метана с поверхности верховых болот Западной Сибири / Е. Э. Веретенникова, Е. А. Дюкарев // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции, Томск, 15–19 октября 2019 года / Под редакцией М. В. Кабанова. – Томск: Аграф-Пресс, 2019. – С. 162-163.
19. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С. Факторы формирования пространственно-временного распределения содержания метана в водных экосистемах. Том Часть 1. – Ростов-на-Дону: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Гидрохимический институт", 2015. – С. 19-24.
20. Гарькуша Д.Н. Глобальная эмиссия метана геологическими источниками / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Фёдоров // Международный научно-исследовательский журнал.- 2019. - №3 (81).
21. Гарькуша Д.Н. Метан в устьевой области реки Дон / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Федоров. – Ростов-на-Дону – Москва: ЗАО «Ростиздат», 2010. – 181 с.
22. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в устьевой области реки Дон. Ростов-на-Дону; М.: Ростиздат, 2010. 181 с.

23. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Роль минерализации (солености) и ионного состава вод в формировании концентраций метана в водных экосистемах // МНИЖ. 2021. №1-2 (103). – С. 6-16.
24. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А. Метан в воде и донных отложениях озера Байкал // Водные ресурсы, 2019. Т. 46. № 5. С. 511-522.
25. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, №6. – 2013. – С. 78-82.
26. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2020. – 44 с.
27. Голубятников, Л.Л. Болота и озера южной тундры Западной Сибири: ландшафтная структура и эмиссия метана / Л.Л. Голубятников, Е.А. Заров / Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт вычислительной математики РАН. – Томск: Томский центр научно-технической информации, 2018. – С. 170-173.
28. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 24.06.1980 N 3009) (ред. от 01.01.2023)
29. Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Зайка Е.А., Виниченко В.Н., Аверочкин Е.М. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: Справочные материалы – Москва: Международный социально-экологический союз, 2000. – 148 с.
30. Дворников Ю.А. Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворённому органическому веществу: диссертация ... кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Дворников Юрий Александрович; [Место защиты: Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук]. - Тюмень, 2016.- 177 с.
31. Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х. Изотопный состав природных вод и современных подземных льдов Лаптевоморского региона / Криосфера Земли, т. VII, № 3. – 2003. – С. 41-48.
32. Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. Почвы криогенных форм микрорельефа тундровой и лесотундровой зон северо-восточной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2022. - №1. – С. 98-108.

33. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – Москва, 2023 – 104 с.
34. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва, 2022 – 104 с.
35. Дубас И. П., Дубас В. В., Алексахин И. В. Теоретические аспекты процессов самоочищения природных водоемов // Научные горизонты. – 2018. – № 8. – С. 51-67.
36. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник Российской академии наук. – 2006. – № 1 (Т. 76). – С. 14–29.
37. Западная Сибирь // Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 2 / Гл. ред. В. П. Орлов. Ред. 2-го тома: А. Э. Конторович, В. С. Сурков. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 477 с.
38. Зиганшин Р.А. Жемчужина Сибири / Р.А. Зиганшин, И.В. Попов, Ю. М. Карбаинов // Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – № 1(41). – С. 74-80.
39. Зиганшин Р.А., Попов И.В. Жемчужина Сибири // Сибирский лесной журнал. – 2017- №3 – С.47-59.
40. Ивахов В. М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Кароль И.Л., Киселев А.А., Зинченко А.В., Сименец Е.С., Полищук В.Ю. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», 2020. – С. 78-95.
41. Игловский С. А. Антропогенная трансформация мерзлотных условий Европейского Севера России и ее последствия // АиС. 2013. №10. С. 107-124.
42. Исследование характеристик парниковых газов на основе солнечной ИК Фурье-спектрометрии и построение физических моделей процессов тепломассопереноса в атмосфере / Научно-технический отчет №П1151 от 27 августа 2009 г. – Екб.: 2011. – 175 с.
43. Ишигенов В.В., Зиганшин Р.А., Карбаинов Ю.А. Оценка окружающей природной среды по трассе проектируемого нефтепровода «Россия – Китай» на территории национального парка «Тункинский». – Красноярск: Сибирский международный институт леса, 2003. – 180 с.
44. Камбалина М.Г., Скворцова Л.Н., Мазурова И.С., Гусева Н.В. К вопросу о методах определения растворимых соединений кремния в воде и способах ее обескремнивания // Известия ТПУ. 2013. №3. – С. 18-22.

45. Карбоновый полигон Карбоновый полигон "Семь Лиственниц" (ЯНАО), 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://carbon-polygons.ru/polygons/seven-larches> (дата обращения – 22.04.2022)
46. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 5–12.
47. Кичигина Н.В. Гидрологические объекты экологически ориентированных видов туризма юго-западного побережья озера Байкал // Современные проблемы сервиса и туризма. – 2019. – №1 (13). – С. 131-140.
48. Корчин В.И., Корчина Т.Я., Терникова Е.М., Бикбулатова Л.Н., Лапенко В.В. Влияние климатогеографических факторов ямало-ненецкого автономного округа на здоровье населения // Журнал медико-биологических исследований, 2021. – №1. – С. 77-88.
49. Кошелева Н. Н. Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. №5. – С. 1-4.
50. Кузин И.Л. О плиоценовом возрасте четвертичных отложений северных районов Западно-Сибирской низменности и Русской равнины // Труды ВНИГРИ, выпуск 220. – 1963. – С. 80-92.
51. Лапердин В.К., Кустов Ю.И., Качура Р.А. Факторы природной нестабильности и техногенных рисков на территории курорта Аршан (бассейн р. Кынгарга, Республика Бурятия) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, № 4. – 2010. – С. 37-45.
52. Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Агатова А.И. Биохимический мониторинг арктических морей России в условиях климатических изменений // ФГУП «ВНИРО», г. Москва, Том 152. – 2014. – С. 101-117.
53. Логинова А. Ю. Роль активных форм кислорода в процессах самоочищения природных водных экосистем / А. Ю. Логинова, Н. А. Силаева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 4-1. – С. 46-51.
54. Логинова А.Ю., Силаева Н.А. Роль активных форм кислорода в процессах самоочищения природных водных экосистем // Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Москва. – 2015. – С. 46-51.
55. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) «Global Network Isotopes in Precipitation» (GNIP) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip> (дата обращения – 30.03.2023)

56. Мигловец, М. Н. Сезонная динамика эмиссии метана с поверхности болота на южной границе криолитозоны / М. Н. Мигловец, М. В. Лукашева // Актуальные проблемы биологии и экологии, Сыктывкар, 04–08 апреля 2016 года. – Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2016. – С. 105-108.
57. Намятов А.А. Особенности распределения концентраций растворенного кислорода в поверхностном слое Арктического бассейна // ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург. – 2011. – С. 76-86.
58. Национальный парк «Тункинский», 1991-2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tunkapark.ru/> (дата обращения - 24.09.2022)
59. Непрерывный мониторинг для получения информации в режиме реального времени / Picarro [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.picarro.com/company/technology> (дата обращения – 30.03.2023)
60. Никитин Ю.П., Хаснулин В.И., Гудков А.Б. Итоги деятельности Академии полярной медицины и экстремальной экологии человека за 1995–2015 года: современные проблемы северной медицины и усилия ученых по их решению // Медицина Кыргызстана, 2015. – № 2. – С. 8–14.
61. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 г. № 552 (с изменениями на 10 марта 2020 г.) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420389120?section=text> (дата обращения – 24.03.2023)
62. ООПТ России, 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://oopt.info/index.php?oopt=360> (дата обращения – 24.09.2022)
63. Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Елсукова Е.Ю., Шейнерман Н.А. Методы физико-химического анализа почв и растений. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2015. – 86 с.
64. Орлова Т.Н., Базлов Д.А., Орлов В.Ю. Химия природных и промышленных вод: учеб. пособие / Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2013. – 120 с.
65. Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Галанин А.А., Железняк М.Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в центральной Якутии / Криосфера Земли, т. XXI, № 2. – 2017. – С. 60–69.
66. РД 52.24.433-2018. Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдодокремниевой кислоты. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2018.

67. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2013.
68. Рельеф Севера Западной Сибири, 2015-2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://poisk-ru.ru/s18744t3.html> (дата обращения – 25.10.2022)
69. Ресурсы поверхностных вод СССР: Т.15. Алтай и Западная Сибирь. Вып.2. Средняя Обь / Н.А. Паниной. – Спб.: Гидрометеиздат, 1972. – 408 с.
70. Решетняк О.С., Даниленко А.О., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Тенденции изменчивости химического состава речных вод Западно-Сибирской части Арктической зоны России // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2019. №3 (203). – С. 70-79.
71. Роль метана в изменении климата 2018, под ред. д.х.н., профессора А.Г. Ишкова [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://clck.ru/34CR3z> (дата обращения – 24.09.2022)
72. Савинова А.А., Фалынскова Н.П. Биогенные элементы в окружающей среде и в живых организмах // Инновационная наука. 2021. №5. – С. 25-28.
73. Самойлова Г.С., Чистякова Н.Ф. и др. Ямало-Ненецкий автономный округ // Большая российская энциклопедия. Том 35. Москва, 2017. – С. 698-704.
74. Санеев Б.Г., Майсюк Е.П. Оценка воздействия топливно-энергетического комплекса Иркутской области на природную среду // Известия БГУ, 2018. – №2. – С. 249-256.
75. СанПиН 1.2.3685-21. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания от 28 января 2021 года N 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения – 24.03.2023)
76. Семенова Е.Н., Сироткин А. С. Процессы биотрансформации азота в технологиях очистки сточных вод // Вестник Казанского технологического университета. 2008. №1. – 42-52.
77. Скакун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А., Козачек А.В., Владимирова Д.О., Верес А.Н., Веркулич С.Р., Сидорова О.Р., Демидов Н.Э. Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Лёд и Снег, Т. 60, № 3. – 2020. – С. 379-394.
78. Скопинцев, Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) / Б.А. Скопинцев // Тр. ГОИН, Т.17(29). – 1950. – 290 с.
79. Смагин А. В. Газовая фаза почвы. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 301 с.

80. Смагин, А.В. Потоки метана в холодное время года: оценка методом закрытых камер / А.В. Смагин, Н.А. Шнырев, Н.Б. Садовникова // Почвоведение. – 2016. – № 2. – С. 227-234.
81. Снакин В.В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность // Жизнь Земли. 2019. №2. – С. 148-163.
82. Солонин Ю.Г., Бойко Е.Р. Медико-физиологические проблемы в Арктике // Изв. Коми науч. центра Урал. отделения РАН, № 4(32). – 2017. – С. 33–40.
83. Состояние и перспективы использования минерально-сырьевой базы Ямало-Ненецкого автономного округа на 15.03.2021 // ФГБУ «ВСЕГЕИ», № 049-00016-21-00. – 2021. – С. 1-12.
84. Состояние лесов и краснокнижных видов сосудистых растений Тункинской долины, 2003 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [54.pdf - Яндекс.Документы \(yandex.ru\)](#) (дата обращения – 24.09.2022)
85. Спектрофлуориметрия для количественного определения ионных концентраций 2009-2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/80/166/33454-6.php> (дата обращения – 22.02.2023)
86. Старых Ю.А., Зарянова Л.Д. Методы исследований при идентификации микроорганизмов / Метод. пособие / Сост.: Т.Д. Ямпольская, А.И. Фахрутдинов. – Сургут: Изд-во СурГУ, 2014. – 45 с.
87. Тункинская долина, 2005 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.baikaltur.com/articles/tunka> (дата обращения – 22.10.2022)
88. Тункинские гольцы в Бурятии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://posibiri.ru/tunkinskie-golcy-v-buryatii/> (дата обращения – 25.10.2022)
89. Тункинский национальный парк, 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://worldgonesour.ru/stati/29831-tunkinskiy-nacionalnyy-park.html> (дата обращения – 24.10.2022)
90. Фалеев М.И., Цыбиков Н.А., Сидорович Т.И. глобальные климатические изменения - фактор активизации природных и антропогенных вызовов населению и окружающей среде // Технологии гражданской безопасности. 2022. №2 (72). – С. 4-10.
91. Федоров Ю.А. Метан в водных экосистемах / Ю.А. Фёдоров, Н.С. Тамбиева, Д.Н. Гарькуша, В.О. Хорошевская. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону – Москва: ЗАО «Ростиздат», 2007. – 330 с.
92. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. - М.: Научный мир, 2009. – 632 с.

93. Физико-географическая характеристика природных условий Западной Сибири 2017-2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://studexpo.net/1177098/ekologiya/fiziko_geograficheskaya_harakteristika_prirodnih_usloviy_zapadnoy_sibiri (дата обращения – 24.09.2022)
94. Физико-географические особенности района, 2015 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://studopedia.ru/10_257774_fiziko-geograficheskie-osobennosti-rayona.html (дата обращения – 24.09.2022)
95. Шполянская Н.А. Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. М.: Изд-во Московского университета, 1981. – 167 с.
96. Эконикс ЭКСПЕРТ, 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.xn----itbbrmlaekfcpedy0l.xn--p1ai/> (дата обращения – 22.10.2022)
97. Arrigo K.R., van Dijken G.L., Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 19. doi: 10.1029/2008GL035028.
98. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*, 1961, No.133, p.1702-1703.
99. Dansgaard, W. (1964) Stable Isotope in Precipitation. *Tellus*, 16, 436-468. <http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
100. Delavau C. J., Stadnyk T., Holmes T. Examining the impacts of precipitation isotope input ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ppt}}$) on distributed, tracer-aided hydrological modelling // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – V. 21. – P. 2595–2614.
101. Detector de Gases Combustibles, 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://proconsamexico.com/productos/detectores-de-gas/explosimetros/explosimetro-spd202ex/> (дата обращения – 22.10.2022)
102. Dzhamalov R.G., Safronova T.I. Vliyanie mnogoletnemerzlykh porod na formirovanie vodnykh resursov Vostochnoi Sibiri. *Vodnye resursy*. 2018, vol. 4, No. 4, pp. 341-352.
103. Engstrom D.R. Influence of vegetation and hydrology on the humus budgets of Labrador lakes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* – 1987. - №44. – P. 1306-1314.
104. Fricke H., O’Neil J. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1999. – V. 170. – P. 181–196.
105. Hansen A.S., Nielsen T.G., Levinsen H., Madsen S.D., Thingstad T. F., Hansen B. W. 2003. Impact of Changing Ice Cover on Pelagic Productivity and Food Web Structure in Disko Bay, West Greenland: A Dynamic Model Approach // *Deep-Sea Res. I*. V. 50. P. 171–187.
106. Helms, J.R., Stubbins, A., Ritchie, J.D., Minor, E.C., Kieber, D.J., Mopper, K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and

- photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // *Limnol. Oceanogr.* – 2008. - №53. – P. 955–969.
107. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia / S. Serikova, J. Karlsson, O. S. Pokrovsky [et al.] // . – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 1552. – DOI 10.1038/s41467-019-09592-1.
108. Joussaume S., Sadourny R., Jouzel J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere // *Nature.* – 1984. – V. 311. – P. 24–29.
109. Kalle K. The problem of gelbstoff in the sea // *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* – 1966. - №4. – P. 91-104.
110. Kazantsev V.S, Krivenok L., Dvornikov Y. Preliminary data on the methane emission from lake seeps of the Western Siberia permafrost zone // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020. - doi:10.1088/1755-1315/606/1/012022.
111. Konen M.E., Jacobs P.M., Burras C.L., Talaga B.J., Mason J.A. Equation for predicting soil organic carbon using loss-on-ignition for north central US soils // *Soil science society of America journal.* 2002. Vol. 66. P. 1878-1881.
112. McGlade C., Michaels K. C., Gould T. Global methane emissions from oil and gas. Insights from the updated IEA Methane Tracker. IEA, 31 Mar. 2020.
113. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuteriumoxygen 18 relationship in precipitation // *Journal of Geophysical Research.* – 1979. – V. 84. – P. 5029–5033.
114. ОНАУС, 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.ohaus.com/ru-RU/> (дата обращения – 22.10.2022)
115. Porcal P., Dillona P.J., Molot L.A. Interaction of extrinsic chemical factors affecting photodegradation of dissolved organic matter in aquatic ecosystems // *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2014, No.13, p.799.
116. Post E., Kerby J., Gooseff M., Ulmer F., Laidre K., Virginia R., Stroeve J., Macias-Fauria M., Mann M., Alley R., Forbes B., Olofsson J., Iler A., Wang M., Christensen T. The polar regions in a 2 °C warmer world / Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias Fauria M., Forbes B.C. // *Science advances.* – 2019. – Vol. 5, N 12.
117. Skorospekhova, Tatiana; Heim, Birgit; Fedorova, Irina; Morgenstern, Anne; Eulenburg, Antje; Alekseeva, Natalia; Evdokimov, Alexander; Chetverova, Antonina; Romanov, Stephan (2017): Colored dissolved organic matter (CDOM) absorption measurements of lakes in the Lena River Delta, Eastern Siberia, 2013-2016. Otto Schmidt Labor, Alfred Wegener Institute, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.875770>

118. Smedsrud L.H., Sorteberg A., Kloster K. 2008. Recent and Future Changes of the Arctic Sea-Ice Cover // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L20503.
119. Touch N., Hibino, Takata H., Yamaji S. Loss on ignition - based indices for evaluating organic matter characteristics of littoral sediments // *Pedosphere*. 2017. Vol. 27. P. 978–984.
120. Twardowski M.S., Lewis M.R., Barnard A.H., Zaneveld J.R.V. In-water instrumentation and platforms for ocean color remote sensing applications.-In: R.L. MILLER et al (eds): *Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments*. Springer: Dordrecht, Netherlands. – 2005. – P. 69–100. - doi:10.1007/978-1-4020-3100-7_4.
121. Vincent W.F., Pienitz R. Sensitivity of high latitude freshwater ecosystems to global change: temperature and solar ultraviolet radiation // *Geosci. Can.* – 1996. - №23. – P. 231–236.
122. Wang X., Wang J., Zhang J. Comparison of three method for organic and inorganic carbon in calcareous soils of northwestern China // *PLoS One*. 2012. Vol. 7, No 8. P. 1–6.
123. Wetzel R.G. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press. – 2001. – P. 731-759.
124. Zaneveld J.R.V. Penetration of ultraviolet radiation into natural waters // In: *Impacts of Climatic Change on the Biosphere*. Dept. of Transportation Climatic Assessment Program, Monogr. – 1975. - №5. – P. 2-108–2-166.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Результаты измерений портативными приборами, Тункинский парк

| № схеме | № п/п | Дата отбора | Место отбора, координаты | рН | Общая минерализация, мг/л | Концентрация кислорода, мг/л | Относительное содержание кислорода, % нас. | t, °С |
|--|----------|----------------|---|------|---------------------------------|---------------------------------|--|-------|
| ЯМАЛО-НЕНЕЦКИЙ АВТОНОМНЫЙ ОКРУГ | | | | | | | | |
| 1 | – | 18.07.2022 | озеро около пинго | 6,96 | 22 | – | – | 24,6 |
| 2 | – | 19.07.2022 | оз. Лебяжье | 8,27 | 124 | – | – | 23,3 |
| 3 | 101 | 19.07.2022 | озеро в г. Салехард | 8,33 | 108 | – | – | 23,4 |
| 4 | 102 | 19.07.2022 | зарастающий пруд в г. Салехард | 8,24 | 300 | – | – | 19,7 |
| 5 | 103 | 20.07.2022 | термокарстовое озеро на карбоновом полигоне | 6,52 | 16 | – | – | 19,3 |
| 6 | 104 | 20.07.2022 | озеро на карбоновом полигоне | 7,22 | 8 | – | – | 21,0 |
| 7 | – | 21.07.2022 | перигляциальное озеро (ледник Романтиков) | 7,80 | 15 | – | – | 9,1 |
| 8 | 105 | 22.07.2022 | протока Вылпосл, г. Лабытнанги | 8,08 | 81 | – | – | 19,5 |
| 9 | 106 | 22.07.2022 | пойма р. Полуй г. Салехард | 8,48 | 161 | – | – | 19,8 |
| Среднее значение | | | | 7,77 | 93 | – | – | 19,9 |
| ТУНКИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ) | | | | | | | | |
| 1 | 3 | 04.08.2022 | старица р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51.708236°, E 101.6475389° | 7,63 | 119 | 5,46 | 57,7 | 18,3 |
| 2 | 4 | 05.08.2022 | заболоченная высокая пойма р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка | – | – | – | – | 24,3 |

| | | | | | | | | |
|----|----|------------|---|------|------|-------|-------|------|
| | | | N 51.705368°, E 101.647482° | | | | | |
| 3 | 5 | 05.08.2022 | заболоченная старица (суходол) р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51.705536°, E 101.647148° | 7,23 | 83 | – | – | 9,5 |
| 4 | 6 | 05.08.2022 | оз. Гурокшэ-Нур, п. Ниловка N 51.706363°, E 101.633631° | 8,76 | 97 | 11,49 | 131,4 | 21,3 |
| 5 | 7 | 06.08.2022 | 101, приток р. Ихе-Ухгунь, п. Хойто-Гол N 51,713424° E 101,655393° | 8,24 | 166 | 7,37 | 73,9 | 14,9 |
| 6 | 8 | 06.08.2022 | р. Ихе-Ухгунь, п. Ниловка N 51,704184° E 101,655393° | 7,93 | 104 | – | – | 17,2 |
| 7 | 9 | 06.08.2022 | 102, болото, п. Хойто-Гол N 51.713206°, E 101.566777° | 8,08 | 19,6 | – | – | 18,5 |
| 8 | 15 | 08.08.2022 | 103, пойма р. Сусер N 51.910543°, E 101.743884° | 9,36 | 182 | 14,9 | 165,8 | 19,8 |
| 9 | 16 | 08.08.2022 | оз. Окинское N 51° 54.816′ E 101° 40.227′ | 8,25 | 67 | 13,27 | 149,6 | 21,3 |
| 10 | 17 | 08.08.2022 | старица оз. Окинское N 51.912749°, E 100.668085° | 8,04 | 92 | 7,53 | 67 | 9,5 |
| 11 | 19 | 11.08.2022 | Желудочный источник, «Хонгор-Уула» N 51.601333°, E 102.359083° | 7,39 | 75 | – | – | 19 |

| | | | | | | | | |
|----|----|------------|---|------|-----|-------|------|------|
| 12 | 21 | 11.08.2022 | Глазной источник, «Хонгор-Уула» N 51.600245°, E 102.360232° | 6,92 | 70 | – | – | 8,6 |
| 13 | 23 | 11.08.2022 | болото на развилке к источникам, «Хонгор-Уула» N 51.588865°, E 102.332334° | 6,62 | 57 | – | – | 12,6 |
| 14 | 29 | 11.08.2022 | р. Иркут, с. Жемчуг N 51° 48.454' E 102° 16.804' | 7,36 | 135 | – | – | 20,7 |
| 15 | 30 | 12.08.2022 | оз. Енгаргинское N 51.765797°, E 102.438165° | 7,6 | 143 | – | – | 23,6 |
| 16 | 33 | 12.08.2022 | оз. Шоршонка N 51,766363°, E 102,441486° | 8,56 | 146 | – | – | 23,6 |
| 17 | 40 | 16.08.2022 | источник «Субурга», д. Тагархай N 51.90770° E 102.34779° | 6,66 | 257 | 10,24 | 88,1 | 8,4 |
| 18 | 41 | 16.08.2022 | источник «Папий», д. Тагархай N 51.88879° E 102.30461° | 6,91 | 146 | 6,81 | 79,7 | 5,9 |
| 19 | 43 | 17.08.2022 | 104, оз. Асанур N 51.721153°, E 102.215404° | 8,34 | 162 | – | – | 24,4 |
| 20 | 44 | 17.08.2022 | оз. Синти N 51.72517° E 102.2210° | 7,48 | 171 | – | – | 25,6 |
| 21 | 45 | 18.08.2022 | оз. Хал N 51.76731° E 102.48091° | 6,47 | 402 | – | – | 15,3 |

| | | | | | | | | |
|------------------|----|------------|---|------|-----|------|-------|------|
| 22 | 46 | 18.08.2022 | оз. Шостахол N 51.76437° E 102.47084° | 8,79 | 156 | – | – | 19,7 |
| Среднее значение | | | | 7,74 | 136 | 9,63 | 101,7 | 14,9 |

Результаты значений концентрации биогенных элементов Тункинского парка

| № | № на схеме | № п/п отбора | Проба | Дата отбора | аммоний, мг/л | нитраты, мг/л | нитриты, мг/л | кремний, мг/л |
|----|------------|--------------|------------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 4 | 6 | оз. Гурокшэ-Нур, п. Ниловка | 06.08.2022 | 0,51 | 0,04 | 0,01 | 2,27 |
| 2 | 5 | 7 | приток р. Ихэ-Ухгунь, п. Хойто-Гол | 06.08.2022 | 0,31 | 0,08 | 0,01 | 2,88 |
| 3 | 6 | 8 | р. Ихэ-Ухгунь | 06.08.2022 | 0,28 | 0,07 | 0,01 | 3,20 |
| 4 | 7 | 9 | зарастающее озеро с. Хойто-Гол | 06.08.2022 | 0,37 | 0,07 | 0,03 | 1,56 |
| 5 | 8 | 15 | пойма р. Сусер | 08.08.2022 | 0,55 | 0,07 | 0,04 | 0 |
| 6 | 9 | 16 | оз. Окинское | 08.08.2022 | 0,97 | 0,06 | 0,03 | 0 |
| 7 | 10 | 17 | старица оз. Окинское | 08.08.2022 | 0,56 | 0,04 | 0,03 | 0,45 |
| 8 | 11 | 19 | источник Желудочный, «Хонгор-Уула» | 11.08.2022 | 0,87 | 0,01 | 0,01 | 8,59 |
| 9 | 12 | 21 | Глазной источник, «Хонгор-Уула» | 11.08.2022 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 10,31 |
| 10 | 13 | 23 | Болото у источников, «Хонгор-Уула» | 11.08.2022 | 1,00 | 0,04 | 0,02 | 7,36 |
| 11 | 14 | 29 | р. Иркут, Вышка | 11.08.2022 | 0,25 | 0,04 | 0,01 | 4,04 |
| 12 | 15 | 30 | оз. Енгаргинское | 12.08.2022 | 1,02 | 0,07 | 0,03 | 1,47 |
| 13 | 16 | 33 | оз. Шоршонка | 12.08.2022 | 0,62 | 0,03 | 0,01 | 0,23 |
| 14 | 17 | 40 | источник «Субурга» | 16.08.2022 | 0,09 | 0,03 | 0,07 | - |
| 15 | 18 | 41 | Источник «Папий» | 16.08.2022 | 0,13 | 0,15 | 0,07 | - |
| 16 | 19 | 43 | 104, оз. Асанур | 17.08.2022 | 0,31 | 0,05 | 0,04 | - |
| 17 | 20 | 44 | оз. Санти | 17.08.2022 | 0,59 | 0,05 | 0,03 | - |
| 18 | 21 | 45 | оз. Хал | 18.08.2022 | 2,33 | 0,12 | 0,07 | - |
| 19 | 22 | 46 | оз. Шостахол | 18.08.2022 | 1,20 | 0,08 | 0,04 | - |

Примечание – нулевые значения указывают, что значения ниже порога обнаружения прибора

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Сводная таблица полученных результатов

| № п/п | Место отбора | H ₄ N, мг/л | NO ₃ , мг/л | NO ₂ , мг/л | Si, мг/л | Поток метана | ППП % | Спект-ый угол наклона S (300-500) | Коэф. наклона Sr | δ ¹⁸ O, ‰ | δ ² H, ‰ | Конц. O ₂ , мг/л | Общая мин-ция, мг/л | pH | t, °C |
|-------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-----------------|----------|--|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|------|-------|
| 1 | озеро около пинго | | | | | | | 0,017 | 0,93 | -13,95 | -104,5 | | | 6,96 | 24,6 |
| 2 | оз. Лебяжье | | | | | | | 0,02 | 0,83 | -11,71 | -98,3 | | | 8,27 | 23,3 |
| 3 | 101, озеро в г. Салехард | | | | | | | 0,018 | 0,71 | -11,56 | -103,9 | | | 8,33 | 23,4 |
| 4 | 102, зарастающий пруд в г. Салехард | | | | | | | 0,009 | 1,46 | -13,48 | -108 | | | 8,24 | 19,7 |
| 5 | 103, термокарстовое озеро на карбонатовом полигоне | | | | | 9,9 | | 0,015 | 1 | -11,9 | -100,4 | | | 6,52 | 19,3 |
| 6 | 104, озеро на карбонатовом полигоне | | | | | 4,2 | | 0,016 | 1,18 | -11,08 | -95 | | | 7,22 | 21 |
| 7 | перигляциаль- ное озеро (ледник Романтиков) | | | | | 2,5 | | 0,016 | 0,8 | -15,87 | -114 | | | 7,8 | 9,1 |
| 8 | 105, протока Вылпосл, г. Лабитнанги | | | | | | | 0,018 | 0,79 | -14,42 | -111 | | | 8,08 | 19,5 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--|------|------|------|------|-----|------|-------|------|--------|--------|-------|------|------|------|
| 9 | 106, пойма р. Полуи г. Салехард | | | | | 2,4 | | 0,017 | 0,07 | -11,72 | -102,3 | | | 8,48 | 19,8 |
| 1 | Старица р. Ихе-Ухгунь, | | | | | 1,8 | | | | | | 5,46 | 119 | 7,63 | 18,3 |
| 2 | Заболоченная высокая пойма р. Ихе-Ухгунь, | | | | | – | | | | | | | | | 24,3 |
| 3 | Заболоченная старица (суходол) р. Ихе-Ухгунь | | | | | 0,5 | | | | | | | 83 | 7,23 | 9,5 |
| 4 | оз. Гурокшэ-Нур | 0,51 | 0,04 | 0,01 | 2,27 | 5,6 | 2,93 | 0,017 | 1,07 | -12,26 | -97,7 | 11,49 | 97 | 8,76 | 21,3 |
| 5 | 101, приток р. Ихе-Ухгунь | 0,31 | 0,08 | 0,01 | 2,88 | | | 0,015 | 0,98 | -14,79 | -108,3 | 7,37 | 166 | 8,24 | 14,9 |
| 6 | р. Ихе-Ухгунь, Нилова пустынь | 0,28 | 0,07 | 0,01 | 3,2 | | | 0,015 | 0,84 | -14,54 | -106,3 | | 104 | 7,93 | 17,2 |
| 7 | 102, зарастающее озеро | 0,37 | 0,07 | 0,03 | 1,56 | | 2,95 | | | | | | 19,6 | 8,08 | 18,5 |
| 8 | 103, пойма р. Сусер | 0,55 | 0,07 | 0,04 | 0 | 8,8 | 1 | 0,018 | 1,08 | -8,31 | -78,3 | 14,9 | 182 | 9,36 | 19,8 |
| 9 | оз. Окинское | 0,97 | 0,06 | 0,03 | 0 | 8,7 | 7,70 | 0,017 | 0,96 | -12,32 | -96,6 | 13,27 | 67 | 8,25 | 21,3 |
| 10 | старица оз. Окинского | 0,56 | 0,04 | 0,03 | 0,45 | 3,6 | 7,64 | | | | | 7,53 | 92 | 8,04 | 9,5 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------------------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|--------|--------|-------|-----|------|------|
| 11 | Желудочный источник, | 0,87 | 0,01 | 0,01 | 8,59 | 0,1 | 3,41 | 0,014 | 1,09 | -14,3 | -105,9 | | 75 | 7,39 | 19,0 |
| 12 | Глазной источник, | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 10,31 | – | | 0,016 | 0,43 | -14,32 | -105,8 | | 70 | 6,92 | 8,6 |
| 13 | болото «Хонгор-Уула» | 1 | 0,04 | 0,02 | 7,36 | 2,9 | 8,67 | 0,016 | 0,78 | -13,66 | -100 | | 57 | 6,62 | 12,6 |
| 14 | р. Иркут, с. Вышка | 0,25 | 0,04 | 0,01 | 4,04 | | | 0,015 | 0,98 | -14,46 | -106,4 | | 135 | 7,36 | 20,7 |
| 15 | оз. Енгаргинское | 1,02 | 0,07 | 0,03 | 1,47 | 42,5 | 7,06 | 0,018 | 0,89 | -13,67 | -103,2 | | 143 | 7,6 | 23,6 |
| 16 | оз. Шоршонка | 0,62 | 0,03 | 0,01 | 0,23 | 92,3 | 8,31 | 0,013 | 1,54 | -4,67 | -61,6 | | 146 | 8,56 | 23,6 |
| 17 | источник «Суборга», д. Тагархай | 0,09 | 0,03 | 0,07 | | | | | | -16,52 | -122,8 | 10,24 | 257 | 6,66 | 8,4 |
| 18 | источник «Папий», д. Тагархай | 0,13 | 0,15 | 0,07 | | | | | | -15,59 | -115 | 6,81 | 146 | 6,91 | 5,9 |
| 19 | оз. Асанур | 0,31 | 0,05 | 0,04 | | 14,4 | 1,24 | | | -13,11 | -101,8 | | 162 | 8,34 | 24,4 |
| 20 | оз. Синги | 0,59 | 0,05 | 0,03 | | 12 | 0,71 | | | | | | 171 | 7,48 | 25,6 |
| 21 | оз. Хал | 2,33 | 0,12 | 0,07 | | 14,3 | | | | | | | 402 | 6,47 | 15,3 |
| 22 | оз. Шостахол | 1,2 | 0,08 | 0,04 | | 26,5 | | | | -4,94 | -63,1 | | 156 | 8,79 | 19,7 |

Примечание: прочерк – значение ниже порога обнаружения прибора; синий оттенок – Ямало-Ненецкий автономный округ, зеленый оттенок – Тункинский национальный парк (Республика Бурятия)