

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт наук о Земле
Кафедра геоэкологии и природопользования

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Заведующий кафедрой
Доктор биологических наук
_____ А.В., Синдирева
_____ 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
магистерская диссертация

ГЕОХИМИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ЗОНЕ
ВЛИЯНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ НАДЫМА)

05.04.06 Экология и природопользование
Магистерская программа «Геоэкология нефтегазодобывающих регионов»

Выполнил (а) работу
студент (ка) 2 курса
очной формы обучения

Закирова Милена
Рифовна

Научный руководитель
Д.б.н, доцент, директор НИИ
экологии и РИПР

Соромотин Андрей
Владимирович

Рецензент
Д.х.н., доцент, директор
Института химии ТюмГУ

Кремлева Татьяна
Анатольевна

Тюмень
2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИИ И ГЕНЕЗИСА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	7
1.1. ПРИЧИНЫ И ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР	8
1.2. МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	15
1.3. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР ...	18
ГЛАВА 2. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ	22
2.1. ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ	22
2.2. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ	23
2.3. ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ	25
2.4. РЕЛЬЕФ И ПОЧВООБРАЗУЮЩИЕ ПОРОДЫ	26
2.5. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ	28
2.6. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ	28
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	31
ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР Г. НАДЫМА	38
4.1. МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР Г. НАДЫМА	38
4.2. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР Г. НАДЫМА	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	53
ПРИЛОЖЕНИЯ 1 - 10	59

ВВЕДЕНИЕ

Характерную черту криолитозоны составляет развитие процессов термокарста и предопределяемые ими формы рельефа – термокарстовые котловины и термокарстовые озера, которые являются отличными индикаторами климатических изменений, деградации вечной мерзлоты [Родионова, с. 3].

Термокарст – процесс протаивания льдонасыщенных грунтов, их просадки и образования отрицательных форм рельефа. Наиболее активным источником эмиссии метана и углекислого газа в арктических и субарктических районах Западной Сибири являются малые термокарстовые озера [Санников, с. 62]. Термокарстовые процессы в ландшафтах вечной мерзлоты часто приводят к широкому образованию озер, а пространственная и временная эволюция термокарстовых озерных ландшафтов отражает совокупное воздействие климата, грунтовых условий и растительности [Holocene Thermokarst Lake..., 2019].

Генезис и геохимия термокарстовых озер Западной Сибири в условиях многолетнемерзлых пород изучены слабо, имеются лишь частичные данные об их гидрохимическом составе, морфометрических особенностях и генезисе озерных котловин.

Изменения естественных геохимических процессов природных сред под влиянием антропогенной деятельности – важнейшая проблема современной геоэкологии. Анализ формирования химического состава поверхностных вод под воздействием различных факторов (физических, химических, биологических, природных и антропогенных) необходим для научно обоснованного прогнозирования качества естественных водоемов в условиях возрастающего антропогенного воздействия [Линник, Набиванец, с.230].

Целью выпускной квалификационной работы является геохимическая оценка термокарстовых озер в зоне влияния города Надыма.

Для достижения поставленной цели автору необходимо было решить ряд задач:

- 1) Изучить особенности гидрохимии и генезиса термокарстовых озёр в криолитозоне Западной Сибири.
- 2) Дать характеристику природно-климатическим условиям Надымского района.
- 3) Рассмотреть основные морфометрические характеристики термокарстовых озёр г. Надыма.
- 4) Провести сравнительный анализ химизма вод и донных отложений фоновых и городских озер термокарстового генезиса.
- 5) Установить факторы формирования геохимических особенностей озерных вод города Надыма.

Объект исследования - термокарстовые озёра в районе г. Надыма.

Предмет исследования - трансформация геохимического состава озерных вод и донных отложений в результате влияния жизнедеятельности г. Надыма.

В выпускной квалификационной работе были использованы следующие методы: картографический, сравнительно-географический, статистический, метод полевых исследований и наблюдений, анализ, геохимический.

Теоретическую и методологическую основу работы составили труды таких научных деятелей как: М.И. Сумгин, С.П. Качурин, Н.Н. Романовский, Ю.Л. Шур, В.Л. Суходровский, Ф.А. Романенко, С.Н. Кирпотин, Ю.М. Полищук, Н.А. Брыксина, Э.Д. Ершов, Р.М. Манасыпов, О.С. Покровский, Г.С. Санников и другие.

Личный вклад автора заключается в сборе полевого материала (отбор проб донных отложений и озерных вод, измерении физико-химических параметров озерных вод, проведении морфометрических промеров озерных котловин), а также в последующей обработке материалов – расчетов морфометрических характеристик озер, построении моделей озерных котловин, статистической обработке результатов геохимических анализов озерных вод и донных отложений.

Научная новизна выпускной квалификационной работы:

1. Впервые на основе натуральных измерений установлены морфометрические и батиметрические особенности термокарстовых озёр г. Надыма.
2. Впервые для городских озёр севера Западной Сибири показан эффект повышения щелочности вод, обусловленный гидрокарбонатами.

Защищаемые положения:

1. Основными отличительными особенностями геохимии городских озёр являются хроническое загрязнение донных отложений нефтепродуктами и нейтральная реакция (рН) озерных вод.
2. Ведущим фактором формирования качества озерных вод в районе города Надыма является близость к городской черте.

Материалами для написания работы послужили результаты, полученные в ходе полевых исследований, а также литературные источники и фондовые материалы НИИ экологии и РИПР ТюмГУ.

Область исследований, в соответствии с паспортом ВАК 25.00.36 (Геоэкология) по наукам о Земле, относится к следующим направлениям [<https://teacode.com/online/vak/>]:

1.8. Природная среда и геоиндикаторы ее изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны.

1.11. Геоэкологические аспекты функционирования природно-технических систем. Оптимизация взаимодействия (коэволюция) природной и техногенной подсистем.

1.12. Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля.

По результатам исследований нами подготовлена и отправлена статья в редакцию журнала «Геохимия» под названием «Геохимия термокарстовых озёр Западной Сибири в зоне влияния арктического города (на примере Надыма)».

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников, 13-и рисунков, 11-и таблиц. Основной текст содержит 58 страниц.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИИ И ГЕНЕЗИСА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Понятие «термокарст» впервые было введено М.М. Ермолаевым в 1932 году, и звучало как «просадочно-провальные формы, возникающие при вытаивании внутригрунтового льда».

Определение термокарста как процесса впервые предложил А.И. Попов в 1953 году, сформулировав его как «Явление просадки поверхности, вызывающее изменение в рельефе. Протекает при протаивании значительно льдистых горных пород или ископаемого льда вследствие увеличения и последовательного смещения вниз деятельного слоя, или при прогрессирующем протаивании» [Санников, с. 15].

Таким образом, термину «термокарст» было дано много разных определений, но объединяет эти определения то, что с понятием «термокарст» связан комплекс процессов, протекающих при неравномерной осадке поверхности, возникающей в результате вытаивания подземных льдов и льдистых горных пород.

Водно-болотные экосистемы Западной Сибири выступают в качестве уникальных природных индикаторов изменения климата, поскольку эти экосистемы наиболее чувствительны к изменениям природной среды. Основной причиной такой чувствительности является наличие мерзлых торфяных залежей, которые становятся крайне нестабильными при сценариях потепления климата и термокарстового развития [Манасыпов, 2014, с. 1177]

Особую роль в исследовании термокарстовых процессов, его механизмов, распространению и генезиса заняли Н.Н. Романовский (1977), М.И. Сумгин (1932, 1940), С.П. Качурин (1961), Ю.Л. Шур (1977), В.Л. Суходровский (1979), Ф.А. Романенко (1997) [Санников, с. 15].

1.1. ПРИЧИНЫ И ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР

Необходимым условием для развития термокарста в естественной среде является наличие подземных льдов в виде мономинеральных залежей или текстурообразующего льда в рыхлых отложениях, но с льдистостью пород, превышающей ее полную влагоемкость в талом состоянии. Высокая степень льдистости пород является главным условием развития термокарста. Другим необходимым условием является увеличение глубин сезонного или многолетнего протаивания. Только тогда, когда глубина сезонного или многолетнего оттаивания начинает превышать глубину залегания залежи подземного льда или сильнольдистой породы, возможно развитие процесса термокарста. Вода, появившаяся при оттаивании льда, отфильтровывается вверх, а талая кровля проседает, заполняя образующуюся полость и создавая на поверхности понижение. В противном случае в массиве пород на месте вытаявших тел остаются пустоты, не проявляющиеся в рельефе и не создающие термокарстовых форм [Родионова, с. 9].

Геоморфологическим фактором, способствующим формированию термокарста и озерных термокарстовых форм, является равнинный характер территории, затрудняющий сток поверхностных вод. При благоприятных условиях дренажа, возможности стока вод и выноса рыхлого материала термокарстовые процессы не приводят к формированию озерных ландшафтов, а способствуют развитию термоэрозионных процессов, формированию долинообразных понижений и систем стока из соединившихся термокарстовых котловин [Родионова, с. 9].

Процесс развития термокарста, как показано В.А. Кудрявцевым, по-разному протекает в случае оттока воды из термокарстового понижения и в случае обводнения понижений. Когда вода не скапливается в понижении, процесс носит затухающий характер. Также В.А. Кудрявцев считал, что

процессы термокарста развиваются вне связи с общей деградацией вечной мерзлоты [Кудрявцев, С. 101–106.].

Такой термокарст обычно прекращается, когда оттаявшие осадки оседают на дне в виде кочек и других блоков породы закрывают не вытаявшую льдистую породу, затем заносятся мелкоземом, зарастают и промерзают сверху и снизу, со стороны мерзлой породы [Веремеева, с. 5].

Если отложения сезонноталого слоя выносятся водой, то вытаявание подземных льдов может возобновиться и постепенно развиваться. В этом случае термокарст обычно сопровождается процессом термической эрозии.

При зарождении бессточного термокарстового понижения процесс развивается иначе. Появление в понижении воды, аккумулирующей солнечное тепло, приводит к повышению температуры поверхности пород дна водоема, что в свою очередь обуславливает увеличение глубины сезонноталого слоя. При этом происходит дальнейшее вытаявание подземного льда и углубление водоема. В итоге это может привести к полному вытаяванию подземного льда и возникновению под водоемом несквозного (при малой мощности мерзлоты — сквозного) подозерного талика.

Развитие бессточного термокарста возможно в любых, даже самых суровых, мерзлотных условиях [Ершов, с. 401].

Общая стратегия цикла превращений: мерзлый бугор мог растаять и через серию мочажин возрастающей обводненности превратиться в термокарстовое озеро; озеро, сбросив свои воды в другой водоем, могло превратиться в спущенное озеро – хасырей; в днище опорожненной озерной котловины обычно начиналось мерзлотное пучение, приводящее к восстановлению мерзлых бугров (рисунок 1) [Кирпотин, Полищук, Брыксина, 2008, С. 185].

В.Л. Суходровский выделил следующие причины возникновения термокарста: потепление климата, в том числе, увеличение континентальности климата, эрозия или денудация, саморазвитие подземных льдов (на поверхности формируются микропонижения полигонального рельефа, заполненные водой), а также деятельность человека [Суходровский, 1979].



Рис. 1. Схема циклической сукцессии развития плоскобугристых болот [Кирпотин, Полищук, Брыксина, 2008, С. 185]

Важным фактором развития термокарстовых озёр является обводнённость территории.

Основной причиной развития термокарстовых озёр В.Л. Суходровский назвал наличие положительного водного баланса. В.Л. Суходровский говорил, что «скопление атмосферной воды в естественных или антропогенно обусловленных западинах на участках развития льдистых отложений может стать началом образования термокарстовых озёр» [Суходровский, 1979].

Такие исследователи как Г.Ф. Гравис, Н.И. Мухин и Е.М. Катасонов основной причиной возникновения термокарстовых понижений называют скопление воды и образование первичных озёр на участках развития подземных льдов [Родионова, с. 10].

Такие исследователи как Н.Н. Романовский, А.И. Попов, В.А. Кудрявцев, С.П. Качурин, Т.Н. Каплина связывают массовое возникновение термокарстовых озёр с изменением внешних термодинамических условий существования мерзлых толщ. Анализ палеогеографических изменений на рубеже плейстоцена и голоцена показывает, что основной причиной массового развития термокарста послужило потепление климата, сопровождавшееся увеличением увлажнённости [Родионова, с. 10].

Причиной возникновения термокарста служит изменение теплообмена на поверхности почвы, при котором либо глубина сезонного оттаивания начинает превышать глубину залегания подземного льда, либо происходит смена знака среднегодовой температуры мерзлых толщ и начинается их многолетнее оттаивание. Изменение теплообмена может быть связано с общей деградацией мерзлых толщ и с изменением составляющих радиационно-теплового баланса поверхности, с динамикой развития растительных, снежных и водных покровов, с иссушением пород сезонноталого слоя [Криолитология, 1985].

Ю.Л. Шур представил совокупность причин возникновения термокарста в виде классификации, представленной в таблице 1, объединяя изменения теплового и водного баланса. [Шур, с. 7-37]

Таблица 1

Причины возникновения термокарста [Шур, 1977]

Процессы	Изменение теплового баланса		Изменение водного баланса	
	Увеличение прихода тепла	Уменьшение термического сопротивления поверхности	Увеличение разности осадки – испарение	Изменение условий дренирования
Природные	Потепление климата; усиление континентальности	Смена растительного покрова; минерализация органогенного горизонта	Увеличение количества осадков; уменьшение испарения; увеличение снежного покрова	Неотектонические движения
Технологические	Искусственные источники тепла	Минерализация органогенного горизонта; уничтожение почвенного покрова; удаление части почвенно-грунтового слоя	Искусственное обводнение	Подпруживание поверхностного стока

Обводнение отдельных участков обычно предшествует термокарсту и является причиной его возникновения, а не следствием. Практически все исследователи говорят о том, что развитие термокарстового процесса возможно лишь при положительном водном балансе.

Помимо этого, исследователи также отмечают влияние неотектоники на развитие термокарста. Таким образом, уменьшение интенсивности образования термокарстовых озер в настоящее время по сравнению с прошлым их

зарождением на участках, характеризующихся тектоническим покоем или поднятием, – закономерный процесс.

Тектонические опускания в свою очередь могут быть причиной ухудшения дренированности территории, обводнения поверхности и зарождения термокарстовых озер. Именно во влиянии на водный режим территории проявляется опосредованная роль неотектоники. [Родионова, с. 11]

Подытоживая анализ возможных причин развития термокарста, Ю.Л. Шур отмечает, что термокарст возникает и протекает в сложных природных системах, которые претерпевают изменения, отражающиеся в локальной изменчивости компонентов систем, перестройке их пространственной структуры. В такой ситуации неприемлемы концепции, ориентирующиеся только на ведущий фактор [Шур, с. 7-37].

Хабибуллин И.Л. предлагает следующую таблицу для пояснения причин возникновения термокарста (таблица 2) [Хабибуллин, с. 21-22].

Мелководные пластовые ледяные озера полностью замерзают зимой, тогда как более глубокие плавучие ледяные озера имеют круглогодичный размороженный осадок. В грунтах под озерами образуются слои незамерзшего грунта, называемые таликами. Полевые измерения исследований озёр Западной Сибири показали увеличение глубины протаивания ниже озер на 5-10 см в год. Эта оттепель прогрессирует обычно быстро в первые годы и со временем замедляется. В целом талики способствуют быстрому таянию под озерами и приводят к тому, что более глубокие запасы углерода становятся биодоступными. Помимо вертикального роста, термокарстовые озера также подвергаются горизонтальному расширению. Обрушение берегов увеличивает площадь поверхности озера, а осыпание прилегающих отложений вносит в озеро органический материал [West, Plug, p. 2].

Причины возникновения термокарста [Хабибуллин, 2007]

Техногенные воздействия			Естественные нарушения	
Механические воздействия на почвенно-растительный покров	Механические и тепловые воздействия на грунты и подстилающие породы	Механические и тепловые воздействия на факторы природной среды, влияющие на водосток	Изменения климата	Изменения степени обводненности территории
Уплотнение и разрыв растительного покрова. Уничтожение растительного покрова. Частичные нарушения почвенного покрова. Полное нарушение почвенного покрова.	Механические: Эксплуатация грунта; Переотложения грунтов, отсыпка насыпей, прокладка траншей. Тепловые: Слив; Оттайка мерзлых грунтов; Растепление	Изменения естественного поверхностного стока; Изменения режима снегонакопления; Искусственные водосборы	Повышение средней годовой/летней температуры воздуха	Изменения количества осадков, ухудшение дренированности территорий
↓	↓	↓	↓	↓
Объекты воздействия термокарста				
Строения, сооружения, фундаменты, линейные коммуникации и др.			Почвы, земли, растительный покров и др.	

Наибольший интерес представляет скорость движения фронта протаивания. Состояние сезонно-талого слоя в течение года изменяется по физико-механическому состоянию на мерзлый, оттаявший и талый грунт. Для сезонноталого слоя большое значение имеет не только вид грунтов, но и их криотекстура, льдистость и влажность, характер химических связей, и особенно - наличие льда в виде прослоек, жил и линз (рисунок 2) [Хабибуллин, с. 21-22].

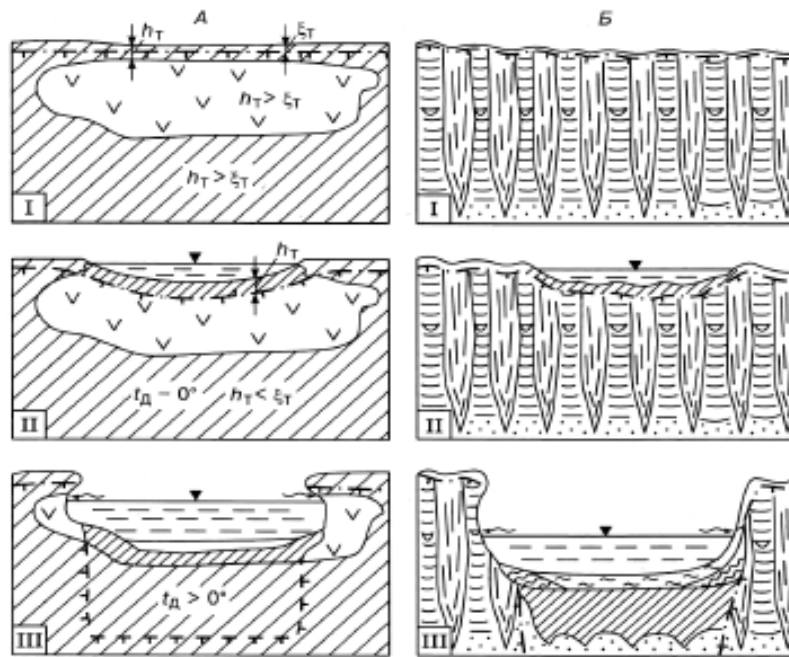


Рис. 2. Схема развития термокарста с образованием озера, где:
 I, II, III – стадии развития; А - при вытаивании мономинеральной залежи подземных льдов; Б
 - при вытаивании льдистых отложений с повторно-жильными льдами, когда процесс
 развивается прогрессивно

[Хабибуллин, с. 21]

Геометрически схема процесса термокарста представлена на рисунке 3.

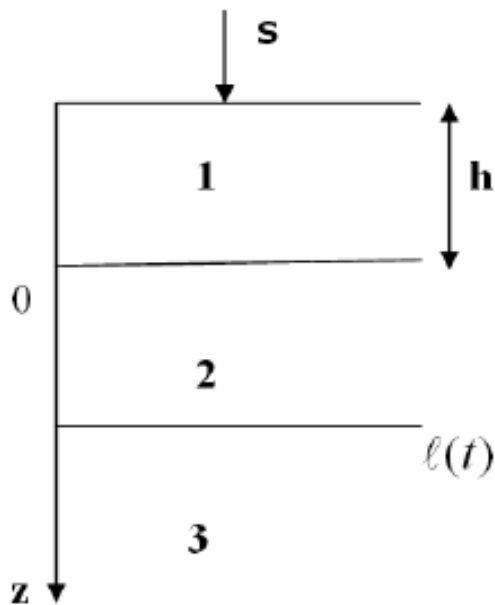


Рис. 3. Геометрическая схематизация процесса термокарста, где:
 1 – Вода, 2 – сезонно-талый слой, 3 – подстилающие многолетнемерзлые породы, $l(t)$ – фронт
 протаивания [Хабибуллин, с. 22]

Термокарстовое развитие является одним из наиболее очевидных последствий деградации вечной мерзлоты. Это явление проявляется как карстоподобные топографические особенности, обусловленные таянием грунтового льда и последующим оседанием земной поверхности. Помимо прямого потепления климата и таяния вечной мерзлоты, термокарст может быть вызван эрозией склонов активного слоя, оседанием, ползучестью почвы и дефляцией, которые приводят к истончению активного слоя и новому тепловому равновесию [John, 2020].

1.2. МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Термокарстовые озера, образующиеся в результате вытаявания подземных льдов различного генезиса, обычно имеют округлую, овально-удлиненную или лопастную форму. Хасыреи представляют собой заторфованные котловины спущенных термокарстовых озёр в сочетании с травяно-сфагново-кустарничковыми болотами, мелкими озерками и формирующимися буграми пучения [Кирпотин, Полищук, Брыксина, 2008, с. 187].

Западная Сибирь характеризуется наибольшим разнообразием и широким распространением термокарстовых форм по всей территории, причем в распределении некоторых из них наблюдается зональность (рисунок 4) [Кравцова, с. 33-42].

Значительные по площади участки с термокарстовыми озерами встречаются на Ямале, Гыдане, в Таз-Пуровском бассейне, небольшие участки и отдельные озера характерны для верхних приводораздельных частей северного и южного склонов Сибирских Увалов, а также районов термокарстовых озёр за пределами зоны многолетнемерзлых пород на левобережье Иртыша [Кравцова, с. 33-42].

Котловины спущенных озёр с кольцевыми прибортовыми заболоченными понижениями и повышенной центральной частью, где происходит

новообразование многолетнемерзлых пород, распространены на юге Ямала, Гыдане, в бассейне Таза и Пура, т.е. в северной геокриологической зоне (зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород), а термокарстовые озера с расчлняющими их перемычками из растительности и сочетание озер с озерково - и грядово-мочажинными болотами и бугристыми торфяниками — в южной геокриологической зоне, на обоих склонах Сибирских Увалов [Кравцова, с. 33-42].

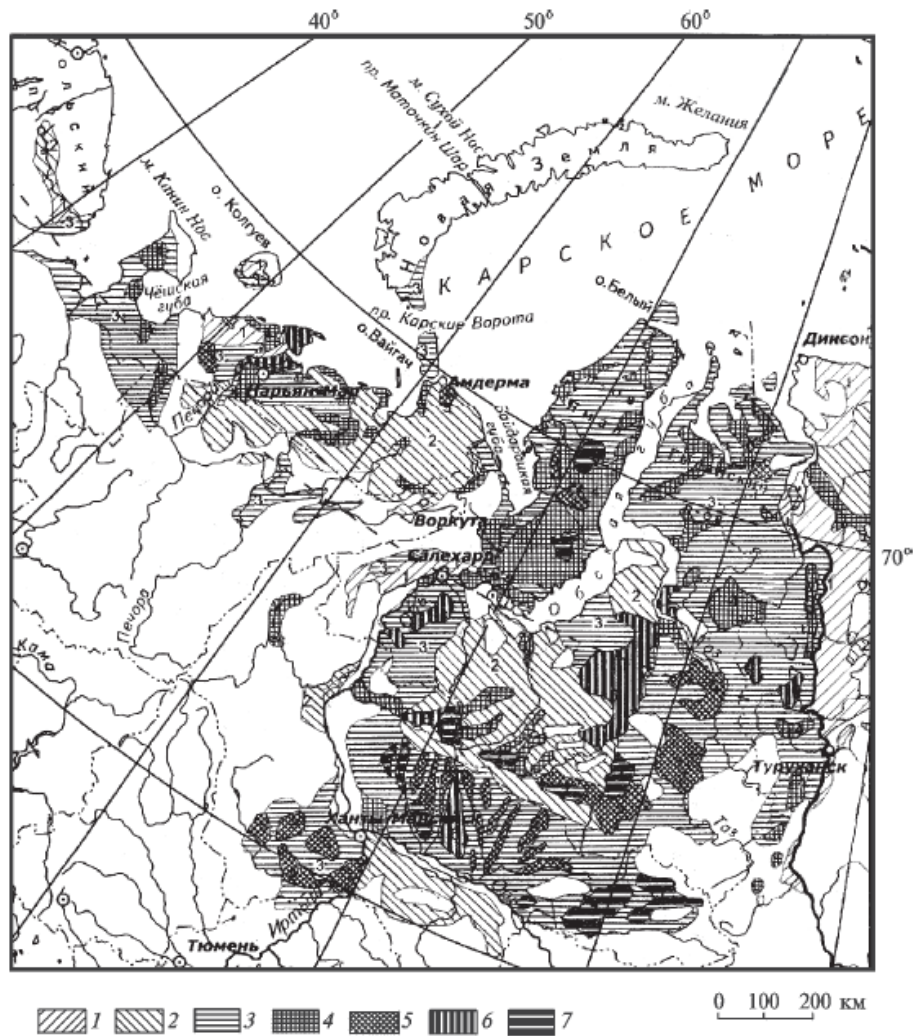


Рис 4. Карта распространения термокарстовых озер на территории России: север Европейской России и Западная Сибирь, где:

Преобладающие размеры озер: 1 — малые; 2 — средние. Сочетания озер разных размеров: 3 — малые и средние; 4 — малые и большие; 5 — малые и крупные; 6 — средние и большие; 7 — средние и крупные. Диаметр малых озер 0,1—0,5 км, средних — 0,5—1,5 км, больших — 1,5—3 км, крупных — 3—6 км

[Кравцова, с. 33-42]

Котловины озер имеют форму параболоида или конуса с несколькими термокарстовыми депрессиями. Берега невысокие, обычно от 0,4 до 2 метров, часто изрезаны клинообразными заливами, во многих местах имеют ступенчатый профиль. В результате ветроволновых процессов сильно подвержены гидротермоабразии, что приводит к частичному или полному их осушению (при расположении в разных гипсометрических уровнях), либо к их слиянию между собой. В итоге образуются водоёмы с очень сложной конфигурацией и характером береговой линии [Демидова, Соромотин, Приходько, 2019, с. 63-65].

Формы термокарстового рельефа и микрорельефа существенным образом зависят от того, какие типы льдов и льдистых пород подвергаются оттаиванию, а также от особенностей распространения льда в мерзлых породах, форм их локализации. В Западной Сибири, где термокарст развивается главным образом на участках льдистых морских, ледниково-морских и ледниковых отложений, содержащих пластовые залежи подземных льдов, термокарстовые котловины называются хасыреями. При оттаивании сингенетических повторно-жильных льдов (при отсутствии стока из просадочных понижений) образуются разные по размерам (до нескольких километров), но достаточно глубокие (до 3—6 м) термокарстовые озера с плоским дном, углубленным на участках активного вытаивания льда до 8—10 м и более. При их осушении или миграции (перемещении) образуются аласные котловины. Хасыреи развиваются обычно на древних аккумулятивных равнинах. Часто при протаивании мерзлых отложений с небольшими полигонально - жильными льдами образуются мелкие озера глубиной до 1,5—2 м с прямоугольными очертаниями берегов. При спуске таких озер в днищах формируются остаточные полигональные бугристые формы микрорельефа. Если вытаивание ледяных жил происходит при хорошем стоке воды, а блоки пород, вмещающие жилы льда, сложены малольдистыми достаточно прочными породами, то формируются останцы пород — байджерахи. Если при этом лед в жилах меняется на грунт, то образуются псевдоморфозы по повторно - жильным льдам [Ершов, с. 401].

Размеры и площадь термокарстовых озер варьируют в пределах широкого диапазона от нескольких метров (пруды) до километров. Термокарстовые озера обычно неглубокие, хотя глубокие тоже встречаются (≥ 10 м).

1.3. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР

Термокарстовые озера как объекты гидрохимического и биогеохимического исследования слабо изучены для севера Западной Сибири, имеются лишь фрагментарные данные по гидрохимическому составу озерных вод и биогеохимическим процессам, протекающим в термокарстовых озерах.

Вода озер богата гуминовыми веществами, которые придают ей темную окраску. Термокарстовые озера относят к ультрапресным с преимущественно атмосферным питанием; температура воды в мелкокотловинных озерах мало отличается от температуры воздуха [Манасыпов, 2012, с. 186-198].

Гидрохимический состав термокарстовых озер довольно различен. Как правило, они отличаются низкой минерализацией, а количество биогенных веществ и органики может изменяться в большом диапазоне, так как их содержание в основном зависит от типа питания озера. В водных объектах с заболоченными водосборами фиксировались высокие концентрации Cu и Mn. Кроме того, также фиксируются довольно низкие показатели pH [Коломоец, Суслеяев, с. 328-331.].

Термокарстовые пруды и озера свидетельствуют о таянии вечной мерзлоты и, наоборот, усиливают глубокое таяние за счет развития талика. В процессе оттаивания ранее сохраненное органическое вещество разлагается и потенциально выделяется в виде парниковых газов углекислого газа и метана. В процессе развития озера и расширения береговой линии как более молодые приповерхностные, так и более старые органические вещества из оседающих берегов потенциально осаждаются в бассейне озера. Внутренняя биопродуктивность озера дополняет накопление углерода в озерных

отложениях и обеспечивает дополнительный источник молодого углерода, превращенного в парниковые газы [Thermokarst lake dynamics, 2012].

Исследования термокарстовых просадок, малых и больших озер и хасыреев, проведенные в зоне островной и прерывистой мерзлоты, выявили систематическое увеличение концентраций растворенного оксида углерода, метана, макрокомпонентов и тяжелых металлов с уменьшением размера водных объектов [Термокарстовые озера – экосистемы..., с. 631-644].

Основным механизмом, ответственным за формирование состава озёрных вод с начала таяния мерзлоты до крупных термокарстовых озер, является прогрессивная минерализация растворенного органического вещества торфа аэробными гетеротрофными бактериями, вероятно, сопровождаемая фоторазложением [Покровский, Широкова, Кирпотин, с. 199-217].

В целом по содержанию микроэлементов в озерах основных природных зон Западной Сибири можно сделать следующие выводы. Содержание макро- и большинства микроэлементов имеет самое высокое значение в зонах южной тайги и лесостепи. Исключением являются железо и алюминий, концентрации которых выше в заболоченных водоемах тундровой и северо-таежной зон, отличающихся высокой цветностью и кислотностью. Кроме Fe и Al для Ti, Ni и Bi самые высокие концентрации также обнаружены в озерах [Геохимические особенности... с. 80 – 89].

Воды термокарстовых озер отличаются повышенными концентрациями Mn, Cu, Fe и Al, которые превышают предельно-допустимые значения для водоёмов рыбохозяйственного значения. Источниками марганца и железа могут являться болотные воды, повсеместно расположенные в зоне тундры, что также является гидрохимической особенностью данной территории. А высокое содержание алюминия и меди обусловлено выветриванием четвертичных отложений, что также связано с геохимическими особенностями территории водосбора.

Вода в термокарстовых озерах чаще всего темного цвета, что связано с высоким содержанием растворенных органических веществ, в то же время, данные воды небогаты растительностью и рыбой.

При усилении термокарстовых процессов на территории Западной Сибири можно прогнозировать увеличение концентрации в водах термокарстовых озер растворенного, но мало биодоступного органического углерода и большинства микроэлементов, которые присутствуют в форме органических и органоминеральных коллоидов. Средний рост концентрация может варьироваться от 200 до 400 % [Геохимические особенности... с. 80 – 89].

Донные отложения характеризуются повышенным содержанием органического углерода и мелкодисперсностью, что объясняет их высокую сорбционную ёмкость и высокие показатели корреляции концентраций химических элементов, связанных с органическим углеродом [Манасыпов, 2013, с. 21].

В условиях севера Западной Сибири преобладает анаэробная деструкция органического вещества, которая не обеспечивает полного разложения трудноокисляемых веществ и органический материал не разлагается до мелких частиц. Подтверждением неполной деградации органического материала в водной среде служат высокие значения содержания органического углерода не только в поверхностном слое, но и при углублении в толщу донных отложений до 20 см. Железо и марганец являются типоморфными для данной территории элементами. Их концентрация и миграционные свойства во многом обуславливают геохимические условия термокарстовых экосистем. Высокие показатели корреляции для микроэлементов и металлоидов донных отложений показывают, что их содержание регулируется содержанием органического углерода, железа и марганца [Манасыпов, Лим, с. 43-45].

Динамика термокарстовых озер очень сложна и менее циклична, чем часто предполагают. Для Сибири сообщалось, что оттепель приводит к первоначальному озерообразованию и расширению озерной площади, за

которым следует быстрое осушение и исчезновение озер. Из-за этих динамических процессов часто считается, что термокарст оказывает значительное влияние в краткосрочной перспективе. Однако его динамическая природа затрудняет точную количественную оценку будущего развития термокарстовых озер, что подчеркивает необходимость получения полевых данных. Данные о динамике микробных CH_4 в термокарстовых озерах имеют важное значение для более точной оценки соотношения выбросов CO_2 к CH_4 . Эти соотношения являются основными входными данными для современных моделей обратной связи по климату вечной мерзлоты. Основные изменения в химии и микробиологии воды происходят, когда оттаивание вечной мерзлоты приводит к образованию небольших термокарстовых водоемов (0,001–0,01 га). [Michiel, p. 769-779]

Вывод:

Условием для развития термокарста является наличие подземных льдов в виде залежей или текстурообразующего льда в рыхлых отложениях, с высокой степенью льдистости пород. Еще необходимыми условиями является увеличение глубин сезонного или многолетнего протаивания и равнинный характер территории.

Основными причинами развития термокарста являются наличие положительного водного баланса и изменение теплообмена на поверхности почвы, при котором глубина сезонного оттаивания начинает превышать глубину залегания подземного льда.

Особенностями геохимии термокарстовых озер являются: ультрапресный состав вод, низкие показатели pH, низкие значения удельной электропроводности.

ГЛАВА 2. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Природные и климатические свойства - важная часть оценки окружающей среды. Выявление физико-географических особенностей исследуемой территории позволяет отслеживать процессы изменения в различных компонентах окружающей среды, чтобы определить причины трансформации. Физико-географические особенности территории оказывают значительное воздействие на формирование озер. Под действием различных факторов озера обладают разными физико-химическими и морфометрическими свойствами, которые влияют на гидрологический режим в озере [Демидова, 2019, с. 13].

Исследуемые термокарстовые озера расположены в окрестностях г. Надым (рисунок 7). Объектами исследования стали 5 озёр, 2 из них расположены на окраине города Надым и 3 фоновых озера на расстоянии 1,5 км в северо-западном направлении. Выбранные озера являются естественными, существовавшими до начала строительства города, характерны для района исследований и имеют термокарстовое происхождение. Подстилающие породы - неогеновые глинистые и верхнечетвертичные песчаные отложения, перекрытые торфом. Летом озера подтопляются надмерзлотными поверхностными водами.

2.1. ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Надымский район расположен в северной части Западно-Сибирской низменности. Общая площадь составляет 110 тыс. км². Основная часть территории района занята тундрой и лесотундрой, покрыта множеством озер и более чем наполовину заболочена. Повсеместно распространена многолетняя мерзлота.

Территория Надымского района выделена в пределах долин р. Надым и ее притоков. Основную часть района занимают поймы рек и III надпойменная терраса, меньшая площадь занята I и II надпойменными террасами. Периферийные районы области граничат с водораздельными равнинами (Казанцевской и Салехардской) [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

2.2. КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Подавляющая часть территории района, за исключением самых северных лесотундровых районов, расположена в подзоне северной тайги с суровым климатом: долгая и холодная зима по 8-9 месяцев с постоянными, часто сильными ветрами, и прохладное лето по 2-3 месяца. Самый теплый месяц в году — июль, среднемесячная температура которого в г. Надым составляет 14 °С. Среднемесячная температура самого холодного месяца (января) составляет — - 28 °С. Среднегодовое количество осадков в г. Надым — 490 мм.

Распределение осадков в течение года неравномерное. Максимальное количество приходится на май — август. Летом осадки выпадают в виде длительных морозящих дождей, а в августе и сентябре — иногда со снегом. Среднегодовое количество осадков составляет 490 мм, в том числе осадки холодного времени года 225 мм. Снег выпадает в октябре — ноябре и сохраняется в различных районах 6—7 месяцев [Геокриологический прогноз..., 1983]. На рисунке 5 представлена карта-схема среднегодового количества выпадающих осадков.

Наибольшие мощности снежного покрова свойственны районам таежной зоны, где его высота может достигать 100 см и более. В лесотундровой зоне, где господствуют зимой сильные ветры преимущественно южных румбов, происходит постоянное перераспределение снежного покрова. Южные ветры сдувают снег с больших площадей и надувают огромные сугробы на склоны северных экспозиций, в оврагах и логах. В результате на большей части территории формируется снежный покров небольшой мощности [Ершов, 1989,

с. 284 - 289]. Анализ карты среднегодового испарения с водной поверхности и карты осадков показал, что на исследуемой территории осадки преобладают над испарением (рисунок 5 и 6) .

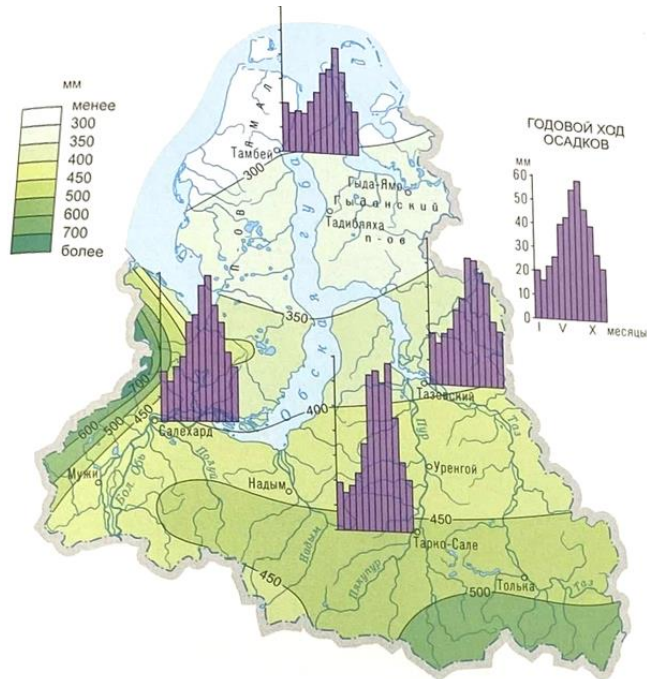


Рис. 5. Среднегодовое количество осадков, мм
[Атлас Ямало-Ненецкого..., с. 113]

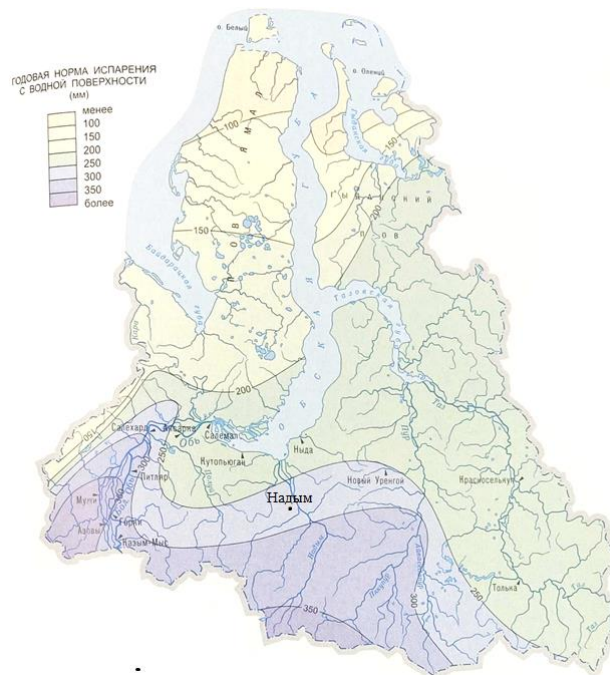


Рис. 6. Среднегодовое испарение с водной поверхности, мм
[Атлас Ямало-Ненецкого..., с. 135]

Согласно материалам атласа Ямало-Ненецкого автономного округа относительная среднегодовая влажность воздуха составляет 76% (рисунок 7).

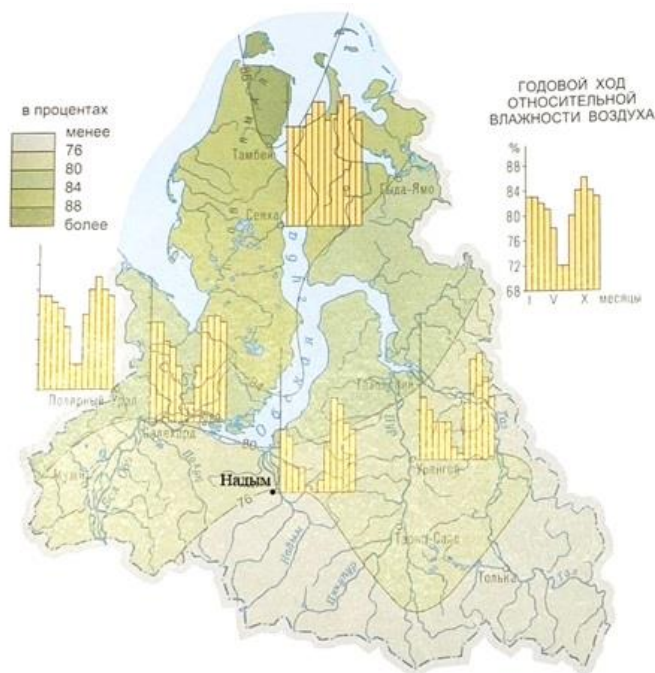


Рис. 7. Среднегодовая влажность воздуха, %
[Атлас Ямало-Ненецкого..., с. 112]

2.3. ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ

В строении рельефа этих территорий принимают участие пойма реки Надым и ее притоков, I и II аллювиальные и III озерно-аллювиальная террасы. Относительное превышение III надпойменной террасы над урезом воды составляет 20 — 30 м. Поверхность плоская, на участках, прилегающих к руслу р. Надым — пологоволнистая. На некоторых участках в долине реки Левая Хетта поверхность осложнена крупными формами бугристо-западинного рельефа. Вблизи берегового уступа террасы довольно часто встречаются крупные раздувы, где формируются песчаные бугры высотой 1—1,5 м и более, гряды и котловины выдувания.

Относительное превышение поверхности II надпойменной террасы над урезом воды в реке 10 — 16 м. Ширина площадки террасы обычно не превышает 5 км, ее поверхность плоская. На хорошо дренированных участках имеются обширные площади раздувов, часто встречаются высокие дюны.

Первая надпойменная терраса имеет относительное превышение поверхности 5 — 8 м. Наиболее широко она развита в среднем течении р. Надым, где ширина террасы превышает 5 км. Относительное превышение поймы 2 — 5 м. По строению поверхности и высоте выделяются высокая и низкая поймы [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

Город Надым полностью расположен в пределах тундрового ландшафта. Поверхность кочковатая, заболоченная, имеющая слабый уклон в западном направлении. Растительные сообщества представлены различными мхами, лишайниками, злаковыми и кустарничком, в основном, багульником [Геокриологический прогноз..., 1983].

2.4. РЕЛЬЕФ И ПОЧВООБРАЗУЮЩИЕ ПОРОДЫ

В неотектоническом плане район расположен на южной окраине Ямало-Ненецкой крупной моноклинали. Площадь территории почти целиком совпадает с Обь - Надымской впадиной. Состав отложений верхней части разреза преимущественно песчаный и лишь в разрезах поймы (вблизи устья р. Надым) и III надпойменной террасы возрастает роль супесей и легких суглинков. Супесчано-суглинистые породы — сильно песчанистые. По литологическому составу геолого-генетические комплексы аллювиальных пород в общем весьма близки между собой.

На всех элементах рельефа широко развиты образования болотного комплекса, существенно влияющие на характеристики современного состояния пород верхней части разреза. Они представлены в основном торфом и перекрывают почти 25% площади территории. Торфяники встречаются на всех террасах и зачастую занимают большую часть их площади. На пойме торфяные отложения приурочены лишь к тыловым частям и занимают около 3 % площади поймы. Мощность торфяников в большинстве районов составляет 1,5 — 2 м.

Распространение, температура и мощность многолетнемерзлых пород. Территория района расположена в северной части зоны совместного распространения многолетне- и сезонномерзлых пород. Состояние отложений района различно — если в самой северной его части в многолетнемерзлом состоянии находится большая часть отложений (до 80—85 % территории), то в центральной и южной мерзлые породы приурочены лишь к площадям обширных торфяников и развиты в основном в пределах надпойменных террас. Специфическая особенность распространения многолетнемерзлых пород — их преимущественно массивно-островной характер в пределах поймы и низких террас и островной и редкоостровной в пределах высоких геоморфологических уровней. Характерная черта криолитологических условий — большие участки с несливающейся мерзлотой, где кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине 5 — 20 м.

Надымский район характеризуется очень широким диапазоном изменения среднегодовых температур пород. Так, в пределах бугристых торфяников среднегодовая температура пород может достигать — 3,5 — 4 °С. На хорошо дренированных прибрежных участках I и II надпойменных террас в южной части области она поднимается до 1,5 — 2 °С, а местами и выше. На большей части территории температуры многолетнемерзлых пород изменяются в основном от —0,5 до —1,5 °С. На плоских участках надпойменных террас, покрытых с поверхности торфом, температура от —1,2 до —1,4 °С. На залесенных участках она изменяется от —0,2 до —1 °С. На участках с несливающейся мерзлотой, приуроченных к кедрово-лиственничным лесам, температура пород близка к 0 °С. В поймах рек многолетнемерзлых пород на юге района встречаются в виде отдельных островов в тыловых частях, покрытых моховыми лесами, или под торфяниками. Как правило, их среднегодовая температура колеблется от —0,2 до —1 °С. На песчаных хорошо дренированных территориях с сосновыми борами и на песчаных раздувах среднегодовая температура пород составляет в основном 1—1,5 °С, а в отдельных случаях достигает 2,5—3 °С [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

2.5. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

На гидрогеологические условия исследуемой территории оказывают влияние наличие речной системы долин реки Надым, большое количество мелких ручьев и множество озер различных по площади, нередко располагающихся группами (рисунок 4).

Подземные воды на исследуемом участке, благодаря избыточному атмосферному увлажнению, получили широкое распространение. Их пространственная изменчивость определяется локальными геологическими условиями [Геокриологический прогноз..., 1983].

Питание озёр осуществляется за счет атмосферных осадков, поверхностных вод, а также за счет таяния льда в грунтах сезонно-талого слоя [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

2.6. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Криогенное строение мерзлых пород района сравнительно однородно. Наибольшее распространение имеют эпикриогенные слабльдистые песчаные породы с массивной криогенной текстурой. Однако льдистость песчаных толщ первых террас во многих районах достаточно высока — 30—40%. Криогенные текстуры песков здесь чаще всего массивные, изредка с включениями и прослоями тонких шпиров сегрегационного льда. Это существенно затрудняет их диагностику, т. е. определение генетического типа толщи, тем более что повторно-жильные льды, надежно идентифицируемые как сингенетические, в толщах песков встречаются редко. В низовьях р. Надым в аллювиальных пойменных отложениях суглинисто-песчаного состава развиты сильнольдистые мерзлые толщи со слоистой криогенной текстурой [Объяснительная записка..., с. 21].

Талые грунты развиты в центральной части г. Надыма, где составляют около 60-65% всей площади. Они приурочены к хорошо дренируемым

песчаными грунтами I надпойменной и пойменными террасами реки Надым. Температура на подошве слоя годовых колебаний изменяется в пределах от + 4 до 0 °С. Среднегодовая температура грунта варьируется от + 0,1 до + 3,2 °С [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

Характерной особенностью исследуемого района является практически сплошное распространение многолетнемерзлых пород, которые служат региональным водоупором для первого от поверхности водоносного горизонта. В зависимости от глубины залегания кровли мерзлых грунтов выделяются следующие типы подземных вод: надмерзлотные воды слоя сезонного оттаивания и надмерзлотные воды несквозных таликов радиационно-теплового и гидрогенного типов.

Среди современных экзогенных геологических процессов ведущая роль принадлежит процессам заболачивания. Они имеют, практически, повсеместное распространение на плоских, слабодренированных участках казанцевской равнины. Этому способствуют климатические, геоморфологические и геокриологические условия: преобладание осадков над испарением, слабая дренированность, существование регионального водоупора - многолетнемерзлых пород [Ершов, 1989, с. 284 - 289].

Эоловые процессы развиты преимущественно по берегам рек и бортам оврагов на незадернованных участках, сложенных песчаными породами.

Среди криогенных процессов преимущественное преобладание имеют сезонные процессы: оттаивание и промерзание верхней части отложений и пучение.

Наиболее широкое распространение имеет сезонное оттаивание пород. Состав пород, слагающих сезонноталый слой, достаточно разнообразен - торф, песок, супесь, суглинок, реже глина. В северной и центральной частях области глубина сезонного оттаивания грунтов меняется от 0,3-0,5 м на участках распространения мощных отложений торфа до 1,8-2,0 м на участках развития песчаных отложений. В южной части глубина сезонного оттаивания заметно больше и составляет 0,5-1,0 м на участках распространения торфов до 2,5-2,7 м

на участках распространения минеральных грунтов [Геокриологический прогноз..., 1983].

Процесс сезонного промерзания пород действует ограничено, в основном, на участках, покрытых древесно-кустарниковой растительностью. Состав отложений слоя сезонного промерзания сходен с составом пород слоя сезонного оттаивания. Мощность слоя сезонного промерзания в зависимости от литологического состава и влажности грунтов изменяется от 0,5-1,5 м на суглинках до 2,5-3,0 м на песках.

Сезонное пучение грунтов проявляется широко на всех геоморфологических уровнях в различных по составу породах - от глин до мелких песков. Этим процессом обусловлено образование пятен-медальонов, мелкобугристого рельефа и сезонных бугров пучения высотой до 1,0 м.

Процесс термокарста имеет относительно широкое, но неравномерное по площади распространение. Отсутствие крупных термокарстовых форм связано, в первую очередь, с отсутствием в верхней части разреза крупных линз льда и невысокой льдистостью отложений [Ершов, с. 401].

Вывод:

Таким образом, вся территория Надымского района расположена в зоне массивно-островного распространения многолетней мерзлоты, что в сочетании большим количеством выпадающих атмосферных осадков и равнинной территорией обуславливает широкое распространение термокарстовых озёр.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования стали 5 озёр, 2 из них расположены на окраине города Надым и 3 фоновых озера на расстоянии 1,5 км в северо-западном направлении (рисунок 8). Выбранные объекты не имеют названий, поэтому мы условно обозначили их как: Фоновое 1 (1Ф) – Приложение 1, Фоновое 2 (2Ф) – Приложение 2, Фоновое 3 (3Ф) – Приложение 3, Городское 1 (1Г) – Приложение 4, Городское 2 (2Г) – Приложение 5.

Оценка изменений морфометрических и гидрохимических характеристик термокарстовых озёр производилась по данным, полученным во время поездки в г. Надым в 2020 - 2021 годах. Географические координаты исследуемых озёр представлены в таблице 3.

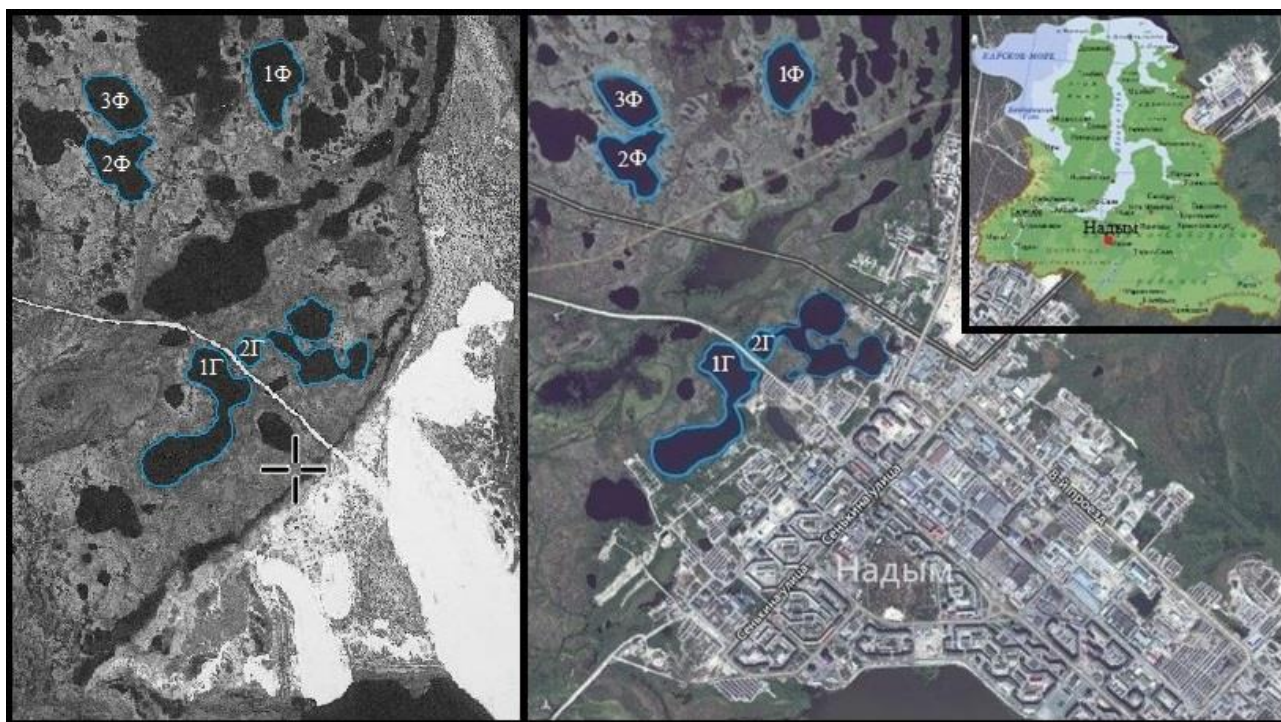


Рис. 8. Обзорная карта-схема расположения исследуемых озёр:

(а) Corona КН-4 21.08.1968 г., (б) снимок с ресурса Bing 2021 г.;

1Г, 2Г – озёра города Надым, 1Ф, 2Ф, 3Ф – фоновые (контрольные) озёра

[Источник космоснимков: <https://ageoportal.ipos-tmn.ru/nadym/>]

Географические координаты исследуемых озер [по данным автора]

Обозначение озера	Координаты
Фоновое 1 (1Ф)	65.557442° N 72.487900° E
Фоновое 2 (2Ф)	65.554381° N 72.486456° E
Фоновое 3 (3Ф)	65.555891° N 72.478432° E
Городское 1 (1Г)	65.543083° N 72.501090° E
Городское 2 (2Г)	65.543961° N 72.510790° E

В ходе полевых исследований в 2020 - 2021 г. определялись максимальные глубины озер, физико-химические показатели, в осенний период производился отбор проб озёрных вод и донных отложений, а в зимний – отбор снежного покрова.

Морфометрические характеристики озер определялись по результатам батиметрической съемки с помощью эхолота GPSmap 421s Garmin, оснащенного GPS навигатором, и построением батиметрических карт с помощью ArcGis 10.4, SASPlanet, MS Excel 2019.

Физико-химические параметры озёрных вод определяли трехкратно на каждом водоеме. Нами определялись следующие параметры: температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), удельная электропроводность (УЭП), общая минерализация (М) приборами фирмы НМ Digital: PH-200, ORP-200, COM-100. Проведение измерений с помощью данных приборов, осуществлялось с резиновой лодки, путем погружения прибора в воду (рисунок 9).



Рис. 9. Измерение водородного показателя, с помощью рН метра (РН-200) [фото автора]

Содержание растворенного кислорода определялось с помощью оксиметра АМТ08 Amstat USA Inc., цветность колориметром HI 727 HANNA, мутность измерялась в единицах на мг/дм³ по каолину с помощью анализатора АМТ 27 Amstat USA Inc (рисунок 10).

Гидрохимический анализ воды и ДО осуществлялся по стандартным методикам в лабораториях Института Химии ТюмГУ и АО «Региональный Аналитический Центр» (г. Тюмень).



Рис. 10. Определение цветности и мутности воды приборами HI 727 HANNA и AMT 27 Amstat USA Inc [фото автора]

Пробы воды с поверхностного слоя (0,5 м от поверхности) обирали стеклянным батометром с центральной части озер с лодки в объеме 1,5 л. Пробы на нефтепродукты отбирались в литровые бутылки (1 л) темного стекла и фиксатором (четырёххлористый углерод). Отдельно отбирались пробы для ICP-MS анализа в пластиковые пробирки (15 см³). Отбор проб верхних 10 см минеральной части донных отложений производился отборником Eijkelkamp. Пробы снега отбирались в марте 2021 года на каждом из озер на всю глубину снежного покрова.

Отбор проводился на основании ГОСТ 17.1.5.05-85 складной совковой лопатой из углеродистого пластика, размером 21x21 см. Также в процессе пробоотбора использовались снегомерная рейка и полиэтиленовые пакеты вместимостью 10–12 дм³. Далее при комнатной температуре в лабораторных условиях пробы растапливали и фильтровали через крупноячеистую сетку и дальнейшем анализом фильтрата. Сразу после полного таяния были

определены физико-химические параметры талой воды теми же приборами, что и при анализе озерной воды [Демидова, 2019, с. 13].

При транспортировке проб все сосуды были плотно закупорены и упакованы, а также утеплены. Посуда, в которую производится отбор проб, была промаркирована.

Содержание микро- и макроэлементов в пробах определяли атомно-эмиссионным (iCAP-6500, Thermo Scientific, США) и масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методами анализа. Для проверки правильности проведения анализа использовали стандартный образец питьевой воды “Trace Metals in Drinking Water” производства High-Purity Standards (США). Также для проверки правильности проведения анализа проводили сравнение результатов атомно-эмиссионного и масс-спектрального определения Li, Al, Mn, Cu, Zn, Sr и Ba. Во всех случаях расхождения в содержаниях этих элементов, определенных двумя методами, не превышала допустимых погрешностей методов. Гидрохимический анализ состава анионов и катионов, сухого остатка осуществлялся по стандартным аттестованным ПНД Ф методикам в Лаборатории экологических исследований Института Химии ТюмГУ.

Анализ нефтепродуктов в воде озер проводился по ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 ПНД Ф 14.1:2:4.128-9, в донных отложениях по ПНД Ф 16.1:2.2.22 – 98.

Для статистической обработки и визуализации полученных данных использовались Statistica 10.0.

При анализе котловины озера стоит учитывать не только её форму, но и рельеф дна. Так, котловина может представлять собой простую впадину или сложную, включающую несколько впадин и возвышений дна [Демидова, 2019, с. 35]. В связи с этим, на основе полученных данных о глубине озёр, с помощью эхолота GPSmap 421s Garmin, а также путем дешифрирования космического снимка, полученного из модуля программного обеспечения ArcGIS 10.4 Open Street Map, были построены карты дна исследуемых озер. Построение батиметрических карт осуществлялось с использованием метода интерполяции - Spline.

В ходе исследования нами были определены следующие морфометрические показатели: площадь зеркала озера (F , км²), длина озера (L , км), максимальная и средняя ширина озера (V_{\max} , $V_{\text{ср.}}$, км), коэффициент удлиненности ($K_{\text{удл.}}$), максимальная и средняя глубины озер (H_{\max} , $H_{\text{ср.}}$, м), объём воды в озере (V , м³).

Пространственные размеры озёр, такие как длина, максимальная ширина и длина береговой линии были получены на основе анализа космических снимков, что позволило более точно определить данные параметры, так как степень достоверности оценки по формуле ниже.

Вычисление площадей озер производилось по полученным космоснимкам с помощью функции «измерение площадей» в программном обеспечении Arcgis 10.4.

Вычисление следующих морфометрических показателей осуществлялось по формулам, согласно общепринятым методикам: коэффициент удлиненности ($K_{\text{удл.}}$) (формула 1), средняя глубина озер ($H_{\text{ср.}}$) (формула 2), показатель ёмкости озерной котловины ($C1$) (формула 3).

Коэффициент удлиненности ($K_{\text{удл.}}$) дает представление о форме озера в плане и рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{удл.}} = L/V_{\text{ср.}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{удл.}}$ - коэффициент удлиненности,

L – длина водоёма, м,

$V_{\text{ср.}}$ – средняя ширина водоёма, м.

Средняя глубина озера – это отношение объема озера к площади его зеркала:

$$H_{\text{ср.}} = V/F, \quad (2)$$

где $H_{\text{ср.}}$ - средняя глубина озера, м,

V - объём водоёма, м³,

F - площадь зеркала водоёма, м².

Показатель емкости озерной котловины определяется как отношение средней глубины озера к максимальной и позволяет сопоставить котловину озера с телами вращения [Шигапов, с. 150]:

$$C1 = H_{cp}/H_{max}, \quad (3)$$

$C1$ - показатель емкости озерной котловины,

H_{cp} - средняя глубина озера, м,

H_{max} - максимальная глубина озера, м.

ГЛАВА 4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР

Г. НАДЫМА

4.1. МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР

Г. НАДЫМА

Морфометрические показатели озерных котловин позволяют судить о генезисе озера, а также отражают особенности развития котловины и ход многих гидрологических процессов, протекающие в воде.

В ходе исследования нами были определены следующие морфометрические показатели: площадь зеркала озера (F , км²), длина озера (L , км), максимальная и средняя ширина озера (V_{\max} , $V_{\text{ср.}}$, км), коэффициент удлиненности ($K_{\text{удл.}}$), максимальная и средняя глубины озера (H_{\max} , $H_{\text{ср.}}$, м), объём воды в озере (V , м³). Результаты исследования представлены в таблице 4.

Таблица 4

Морфометрические характеристики исследованных озера [по данным автора]

Показатели	1Ф	2Ф	3Ф	1Г	2Г
Площадь зеркала озера (F , км ²)	0,08	0,097	0,08	0,184	0,164
Длина озера (L , км)	0,43	0,453	0,394	1,057	0,98
Максимальная ширина озера (V_{\max} , км)	0,294	0,359	0,244	0,246	0,156
Средняя ширина озера ($V_{\text{ср.}}$, км)	0,192	0,219	0,206	0,188	0,192
Коэффициент удлиненности ($K_{\text{удл.}}$)	2,239	2,068	1,913	5,622	5,104
Максимальная глубина (h_{\max} , м)	1,2	0,7	0,7	0,9	1,3
Средняя глубина ($h_{\text{ср.}}$, м)	0,70	0,60	0,58	0,78	0,82
Емкость озерной котловины ($C1$)	0,58	0,86	0,83	0,70	0,63
Объём воды в озере (V , млн м ³)	0,058	0,059	0,047	0,155	0,154

Площадь водного зеркала озера является одной из важных морфометрических характеристик. По результатам измерений площади зеркала, исследуемые озёра были отнесены в соответствии с классификацией В.П. Иванова (1948):

1. Фоновые озёра (1Ф, 2Ф, 3Ф) отнесены к «озеркам» (с площадью 0,001-0,01 и 0,02-0,1 км²).
2. Озёра г. Надым (1Г, 2Г) отнесены к категории «очень малые» (с площадью от 0,1—1,0 км²).

Относительные морфометрические показатели озёр отражают форму котловины. Длина котловины (L) изменяется в пределах от 0,394 до 1,057 км. Максимальная ширина (V_{\max}) варьирует от 0,156 до 0,359 км, а средняя – от 0,188 до 0,219 км. При сравнительно малой длине, малые ширины озёр указывают на термокарстовое происхождение водоемов.

Показатель удлиненности ($K_{\text{удл.}}$) дает представление о форме озера в плане и рассчитывается по формуле 1. По классификации С. В. Григорьева (1959) исследуемые озёра имеют форму котловины близкую к овалу.

Согласно классификации по средней и максимальной глубине (по Китаеву, 1984) исследуемые озера по средней и по максимальной глубине относятся к «очень малым».

Было рассчитано соотношение средней глубины к максимальной ($C1$) по формуле 3. Таким образом, по значению показателя емкости озера исследуемые озера имеют форму котловины подобной параболоиду и конусу.

Исследуемые озера имеют небольшой объем и малую глубину, являются мелководными, следовательно, их промерзание и оттаивание происходит быстрее, чем у озёр иного происхождения. Установление ледостава происходит через 1–2 дня после того, как среднесуточная температура воздуха опускается ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Демидова, 2019, с. 34]. Также, в исследуемых нами термокарстовых озерах г. Надыма происходит промерзание воды до дна.

При анализе котловины озера стоит учитывать не только её форму, но и рельеф дна. Так, котловина может представлять собой простую впадину или сложную, включающую несколько впадин и возвышений дна. В связи с этим, были построены батиметрические карты в программном обеспечении ArcGis 10.4, которое осуществлялось с использованием метода интерполяции – Spline с построением модели рельефа дна каждого озера в модуле Arcshane (приложения 6 - 10).

Вывод:

Формы котловин термокарстовых озёр разнообразны (воронкообразные, блюдцевидные и т.д.), площади изменяются от 0,08 до 0,164 км². Преобладают

глубины до 1 м, максимальная глубина достигает 1,3 м. Котловины озер имеют форму параболоида с несколькими термокарстовыми депрессиями.

Таким образом, сравнивая исследуемые озера с озерами, имеющими термокарстовое происхождение, анализ морфометрических характеристик показал, что озера имеют небольшую площадь и относятся к категории «очень малое», при этом имеют очень малую среднюю и максимальную глубину, что соответствует озерам термокарстового происхождения.

4.2. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР Г. НАДЫМА

Питание термокарстовых озер, осуществляется в основном за счет талых снеговых вод (до 75 % стока), дождевые воды имеют подчиненное значение (15–20 % стока), доля подземных вод составляет 5–10 % либо отсутствует [Нормальные алканы..., с. 213-217]. Статистические характеристики физико-химических параметров и химического состава озерных, донных отложений и талых снеговых вод представлены в таблицах 5 - 8.

Таблица 5

Статистические характеристики физико-химических параметров вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма [по данным автора]

Показатели	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
рН, ед.	4,90 (4,20 – 5,40) ***	7,6
	6,34 (6,20 – 6,82)	3,7
Удельная электропроводность, $\mu\text{S}/\text{cm}$	12,0 (9,6 - 12,6) ***	11,7
	71,1 (52,2 - 81,6)	20,7
Солесодержание, ppm	7,6 (6,0 – 8,0) ***	0,9
	47,7 (39,6 - 55,5)	7,0
Окислительно-восстановительной потенциал, mV	256 (160 – 266) ***	56
	38 (11 – 63)	10
Растворенный кислород, мг/дм ³	9,2 (7,8 - 10,2) ***	9,6
	6,6 (6,0 – 7,3)	9,3
Мутность, ед.	2,4 (2,3 – 3,2) *	13,1
	1,9 (1,9 - 2,6)	11,2
Цветность, град.	120 (110 – 130) ***	7
	68 (55 – 80)	20

Примечание: - различия достоверны при * P <0,05; *** P <0,001.

Статистические характеристики основных геохимических показателей фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма [по данным автора]

Показатели	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	21 (16 - 21) *	15
	10 (9 - 10)	7
Ионный состав, мг/дм ³		
NO ₃ ⁻	0,236 (0,212 - 0,325)	23
	0,295 (0,136 - 0,453)	76
SO ₄ ²⁻	0,66 (0,30 - 0,95) **	51
	3,99 (3,36 - 4,62)	22
HCO ₃ ⁻	<6,1 **	Не определен
	33,5 (26,8 - 40,3)	24,6
Cl ⁻	0,59 0,39 - 1,48	71
	1,53 (1,37 - 1,69)	15
PO ₄ ³⁻	<0,05	4
	0,06 (<0,05 - 0,09)	80
K ⁺	0,25 (0,24 - 0,26) *	4
	1,43 (1,06 - 1,79)	36
Na ⁺	1,44 (1,19 - 1,97) *	26
	3,60 (3,44 - 3,75)	6
Mg ²⁺	2,84 (0,52 - 3,28)	67
	1,64 (1,59 - 1,68)	4
Ca ²⁺	8,4 (7,9 - 10,7)	16
	6,5 (4,7 - 8,5)	41
Сумма катионов	12,7 (12,4 - 13,9)	6
	13,3 (15,72 - 7,58)	36
Сумма анионов	4,4 (4,3 - 5,7) **	17
	39,4 (31,7 - 47,2)	38
Сухой остаток	<50*	Не определен
	67 (51 - 84)	35
Содержание нефтепродуктов в воде, мг/дм ³		
Сумма ИК	0,05 (0,03 - 0,06)	33
	0,21 (0,12 - 0,30)	59
Сумма ФЛ	0,04 (0,03 - 0,04)	13
	0,218 (0,10 - 0,34)	79
Сумма аренов	Менее 0,01	Не определен
	0,04 (0,01 - 0,06)	0,01
Содержание нефтепродуктов в ДО, мг/кг		
Сумма ИК	26 (6 - 74) *	99
	282 (225 - 338)	28
Гидрохимическая формула Круглова		
Фон	M17,78 $\frac{\text{HCO}_3\ 69\ \text{SO}_4\ 14\ \text{Cl}\ 13[\text{NO}_3\ 4]}{\text{Ca}\ 65\ \text{Mg}\ 22\ \text{Na}\ 11\ [\text{K}\ 2]}$	Класс гидрокарбонатных, группа кальциевых, 3 тип
Город	M70,36 $\frac{\text{HCO}_3\ 85\ \text{SO}_4\ 11\ [\text{Cl}\ 4]}{\text{Ca}\ 50\ \text{Na}\ 27\ \text{Mg}\ 12\ \text{K}\ 11}$	Класс гидрокарбонатных, группа кальциевых, 1 тип

Примечание: различия достоверны при * - P < 0,05; ** - при P < 0,01.

Статистические характеристики физико-химических параметров талых снеговых вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
[по данным автора]

Показатели	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
рН	8,03 (7,87 – 8,04) *	1,2
	7,73 (7,72 – 7,73)	1,0
Удельная электропроводность, $\mu\text{S/cm}$	6,4 (4,6 – 6,4) *	14,7
	8,6 (8,0 – 9,1)	9,1
Солесодержание, ppm	4,2 (3,2 – 4,3) *	15,6
	5,9 (5,6 – 6,1)	6,0
Окислительно-восстановительной потенциал, mV	162 (158 – 167) *	3
	178 (177 – 178)	10

Примечание: - различия достоверны при * $P < 0,05$.

Статистические характеристики основных геохимических показателей талых снеговых вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
[по данным автора]

Показатели	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	1,1 (0,4 – 1,5)	56
	0,5 (0,3 -0,7)	54
Ионный состав, мг/дм ³		
NO ₃ ⁻	0,95 (0,78 - 1,16)	20
	1,09 (1,02 -1,15)	8
SO ₄ ²⁻	0,56 (<0,50 - 0,57)	40
	0,39 (<0,50 - 0,53)	51
HCO ₃ ⁻	<6,1	Не определен
	<6,1	Не определен
Cl ⁻	<0,5	Не определен
	0,44 (<0,50 - 0,62)	60
PO ₄ ³⁻	<0,25	Не определен
	<0,25	Не определен
K ⁺	<0,5	Не определен
	<0,5	Не определен
Na ⁺	<0,5	Не определен
	0,58 (<0,5 - 0,90)	80
Mg ²⁺	<0,25	Не определен
	0,41 (<0,25 – 0,69)	98
Ca ²⁺	0,71 (0,52 – 0,79)	21
	0,92 (0,90 – 0,93)	2
Сумма катионов	1,34 (1,15 – 1,42)	11
	2,15 (1,56 – 2,74)	39

Сумма анионов	5,44 (4,96 – 5,66)	7
	6,10 (5,20 – 7,00)	21
Сухой остаток	5,0 (4,2 – 5,1)	10
	7,5 (6,4 – 8,6)	21

Вода исследованных озер ультрапресная (минерализация воды не превышает 70 мг/дм³, сухой остаток 70 мг/дм³, общее солесодержание 55,5 ppm). Максимальная УЭП не превышает 81,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Кислотность характеризуется от кислой до слабокислой и близкой к нейтральной (рН от 4,20 до 6,82). Значения окислительно-восстановительного потенциала в пределах от 11 до 266 mV, что свидетельствуют как о переходной, так и об окислительной окислительно-восстановительной ситуации в различных озерах. Также можно отметить, что физико-химические параметры поверхностных вод фоновых и городских озер отличаются. Фоновые воды существенно кислее по значению рН, значительно менее минерализованы и, вследствие этого, имеют в 6 раз ниже значения удельной электропроводности.

Вода фоновых озер более темнее и содержит больше взвеси, более насыщена кислородом, что создает значительный окислительно-восстановительный потенциал реакции. Вода городских озёр имеет близкую к нейтральной реакцию рН, более минерализована, содержит мало растворенного кислорода, переходную окислительно-восстановительную среду с неустойчивым геохимическим режимом, менее окрашена и более прозрачна.

Талые снеговые воды, характеризуются слабощелочной реакцией (до 8,04 ед. рН), низкими солесодержанием (до 9,1 ppm) и значениями электропроводности (до 9,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$), окислительно-восстановительная ситуация близка к окислительной (окислительно-восстановительный потенциал до 178 mV). Медианы указанных параметров территорий снегонакопления фоновых и городских озер достоверно отличаются (при $P < 0,05$), талые снеговые воды близлежащих к городу озер немного кислее и более минерализованные.

Содержание главных ионов в воде озер г. Надыма довольно низкое. Основным анионом является гидрокарбонат-ион, а катионом – ион кальция

(таблица 6). Озера группы кальциевых гидрокарбонатного класса с низкоминерализованными водами и высокими значениями перманганатной окисляемости наиболее типичны для севера Западной Сибири [Геохимические особенности..., с. 80 – 89].

Вода фоновых озер отличается значительно более низкой общей минерализацией по сравнению с городскими озерами (17,78 и 52,67 мг/дм³), меньшими значениями сухого остатка. Отмечается достоверное более низкое содержание в поверхностных водах фоновых озер по сравнению с городскими таких ионов как HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ , вследствие чего в воде городских озер сульфаты, хлориды и нитраты практически полностью заменяются гидрокарбонатами, что обуславливает изменение кислой реакции среды на нейтральную. По величине перманганатной окисляемости можно судить об относительных количествах легко окисляемых органических соединений в природных водах. Уровень перманганатной окисляемости воды фоновых озер вдвое выше значений городских озерах, что, наряду с большей цветностью свидетельствует о более высоком содержании органического углерода в воде фоновых озер [Влияние природных и антропогенных факторов..., с. 41-56.].

Содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях городских озер значительно превосходит аналогичные значения для фоновых: более чем в 4 и 11 раз соответственно (таблица 6).

Анализ снеговых талых вод не выявил существенных различий в геохимии снега, отобранного со льда фоновых и контрольных озер. При этом физико-химические параметры достоверно различаются, талые снеговые воды городских озер более кислые, содержат больше солей и имеют более высокую электропроводность по сравнению с фоновыми озёрами.

Большинство озер севера Западной Сибири, так же, как и исследуемые озёра, имеют низкие значения удельной электропроводности, общего солесодержания и концентрации основных ионов, что подтверждает обусловленность минерального состава озерных вод и талых снеговых вод для

подпитки, в отличие от миграции подземных вод [Physical and chemical characteristics..., с. 989-1008].

В рассматриваемых озерах слабощелочные снеговые талые воды не компенсируют кислотность фоновых озерных вод из чего следует значительное повышение значений рН вплоть до нейтральной реакции в воде городских озер, что скорее всего, носит техногенных характер.

Корреляционный анализ сходства снеговых талых вод по всем показателям, отобранных проб снега с поверхности льда показал полное сходство между всеми изученными озерами (таблица 10), со значительно меньшим Евклидовым расстоянием, по сравнению с различиями озерных вод (рисунок 12).

Городские и фоновые озера образуют два достоверно различаемых кластера, что подтверждается корреляционным анализом (рисунок 11, таблица 9). Кластерный анализ показывает, что городские и фоновые озера составляют два разных кластера, достоверно различающиеся по абсолютному большинству показателей.

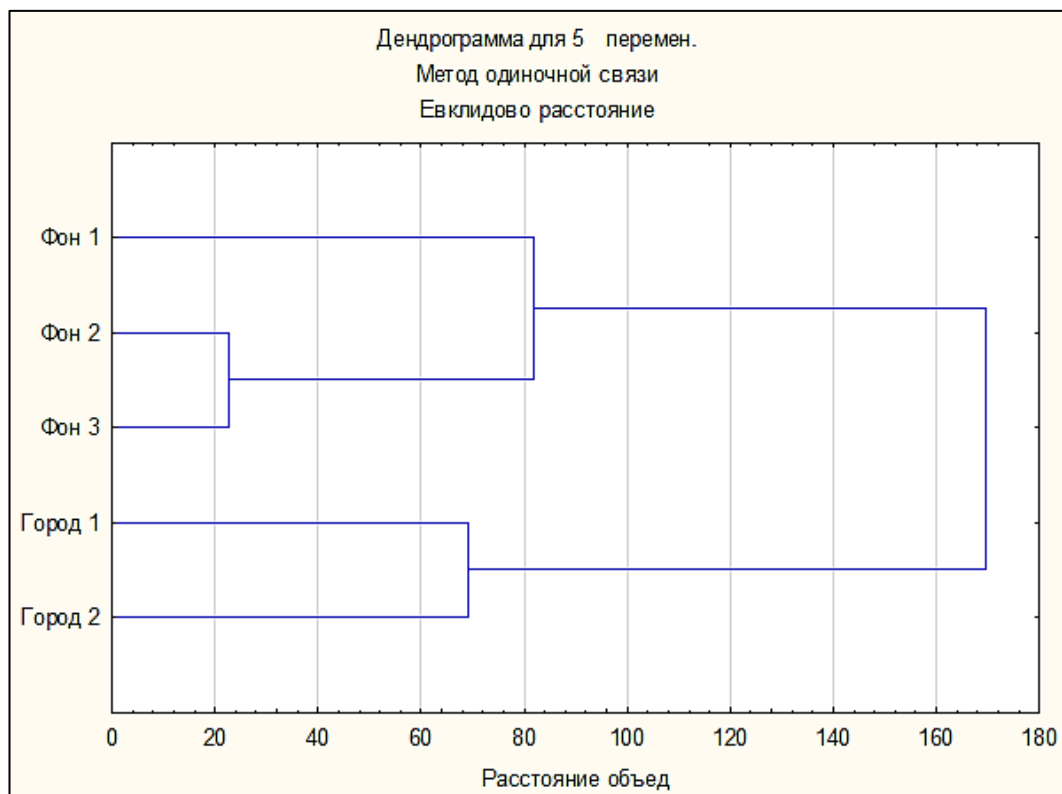


Рис. 11. Дендрограмма объединения (типизации) фоновых и городских озер города Надыма [по материалам таблиц 5 и 6]

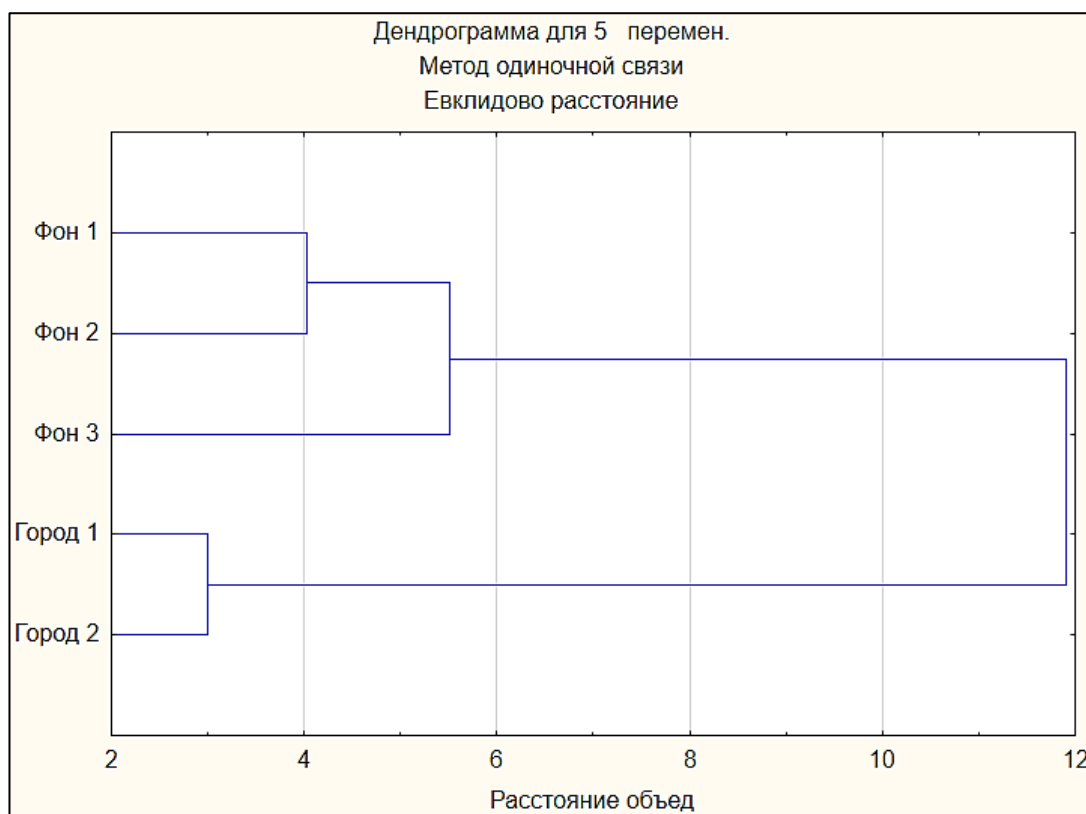


Рис. 12. Дендрограмма объединения (типизации) фоновых и городских озер города Надыма
[по материалам таблиц 7 и 8]

Таблицы 9 и 10 показывают, что все озера по исследованным показателям подобны друг другу и их можно подвергать сравнительному анализу между собой.

Таблица 9

Корреляционная матрица сходства гидрохимических показателей воды
исследованных озер (по материалам таблиц 5 и 6) [по данным автора]

Озера	Фон 1	Фон 2	Фон 3	Город 1	Город 2
Фон 1	1,000				
Фон 2	0,989***	1,000			
Фон 3	0,973***	0,997***	1,000		
Город 1	0,439	0,339	0,288	1,000	
Город 2	0,504	0,465	0,448	0,808***	1,000

Примечание: *** корреляции значимы на уровне $p < 0,001$.

Корреляционная матрица сходства гидрохимических показателей снеговых талых вод исследованных озер (по материалам таблиц 7 и 8) [по данным автора]

Озера	Фон 1	Фон 2	Фон 3	Город 1	Город 2
Фон 1	1,000				
Фон 2	0,996***	1,000			
Фон 3	0,984***	0,973***	1,000		
Город 1	0,948***	0,931***	0,937***	1,000	
Город 2	0,989***	0,979***	0,977***	0,980***	1,000

Примечание: *** корреляции значимы на уровне $p < 0,001$.

Повышение щелочности вод городских озер напрямую связан с абсолютным преобладанием гидрокарбонатов, по сравнению с анионами сильных кислот – хлоридами, сульфатами, фосфатами и нитратами. Известно, что основными природными источниками гидрокарбонатов в поверхностных водах являются карбонатные породы (известняки, мергели, доломиты), а также процессы биохимического распада органического вещества в воде и донных отложениях [Порфирьева, с. 88].

Однако, вторая надпойменная терраса, на которой расположены исследованные озера, сложена песчаными эоловыми отложениями, перекрытыми органическими осадками. В настоящее время основным источником избыточного содержания гидрокарбонатов в воде городских озер является строительный мусор, которым захламлены берега озёр промзоны города Надыма. Вероятно, что выявленное техногенное повышение концентрации гидрокарбонатов является следствием работы городского домостроительного комбината в прошлом, загрязнявшему близлежащую территорию цементной пылью.

Еще одним отличием фоновых вод от городских вод озер Надыма является содержание нефтепродуктов. В воде городских озер, как при использовании в аналитике ИК-спектрометрии и флуориметрии содержание

нефтепродуктов многократно превышает значения для фоновых вод (таблица 6). Также повышено содержание ароматических соединений.

Основным источником поступления нефтепродуктов в воды озёр города Надым являются поверхностные стоки с территорий гаражных кооперативов и свалок, расположенных в непосредственной близости к озерам (рисунок 13).



Рис. 13. Захламленные берега городских озёр г. Надым [фото автора]

Хроническое нефтяное загрязнение подтверждается 10-кратным превышением концентраций нефтепродуктов в донных отложениях озёр города Надым по сравнению с фоновыми озёрами (таблица 6).

С помощью факторного анализа методом главных компонент, который позволяет объединить различные показатели качества природных вод Надымских озёр в группы, выделил три основных фактора (таблица 11). Первый фактор, обусловленный пространственным расположением озёр, объединил показатели, взаимная корреляция которых обуславливает наибольшую долю общей дисперсии – 65,3 %. Таким образом, природные

особенности воды термокарстовых озер, такие как высокая кислотность, окислительно-восстановительный потенциал и цветность имеют высокую достоверную связь с удаленностью от города, а сухой остаток, содержание основных анионов и катионов, нефтепродукты в воде и донных отложениях, обусловлено близостью к городской черте.

Таблица 11

Результаты факторного анализа по физико-химическим и геохимическим параметрам озер Надыма (матрица факторных нагрузок) [по данным автора]

Показатель	Факторные нагрузки		
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
pH, ед. pH	-0,982	-0,159	0,029
Удельная электропроводность мкСм/см ³	-0,956	-0,276	-0,071
Солесодержание, ppm	-0,487	0,844	0,212
Сухой остаток, мг/дм ³	-0,901	0,430	0,057
Окислительно-восстановительный потенциал, mV	0,943	-0,104	-0,130
Кислород	0,894	-0,306	0,134
Мутность	0,697	0,389	0,281
Цветность	0,914	0,223	0,314
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	-0,330	0,857	-0,326
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	-0,971	0,206	0,013
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	-0,955	-0,270	-0,102
Cl ⁻ , мг/дм ³	-0,707	-0,365	0,428
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	-0,624	0,769	0,122
K, мг/дм ³	-0,921	-0,367	-0,113
Na, мг/дм ³	-0,979	0,027	0,168
Mg, мг/дм ³	0,248	-0,237	0,939
Кальций	0,636	-0,518	-0,566
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	0,349	0,269	-0,894
Нефтепродукты (вода), мг/дм ³	-0,809	-0,566	-0,069
Нефтепродукты (донные отложения), мг/кг	-0,958	-0,266	-0,106
Удаленность от центра города, м	0,980	-0,009	0,165
Доля общей дисперсии, %	65,3	18,1	12,7

Примечание: жирным шрифтом отмечены нагрузки > 0,700.

Вывод:

Вода городских озер отличается значительно более высокой общей минерализацией по сравнению с фоновыми (52,67 и 17,78 мг/дм³), меньшими значениями сухого остатка.

Отмечается достоверное более низкое содержание в поверхностных водах фоновых озер по сравнению с городскими таких ионов как HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ , вследствие его происходит изменение кислой реакции среды на нейтральную.

Городские озера содержат меньшее количество органического углерода по сравнению с фоновыми озерами.

Содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях городских озер значительно превосходит аналогичные значения для фоновых: более чем в 4 и 11 раз соответственно.

Более высокая минерализация вод городских озер по сравнению с фоновыми объясняется поступлением растворимых солей с поверхностным стоком загрязненных вод с прилегающей к озерам захламлённой и застроенной территории.

Эффект повышения щелочности вод городских озер напрямую связан с абсолютным преобладанием гидрокарбонатов, по сравнению с анионами сильных кислот – хлоридами, сульфатами, фосфатами и нитратами, основным источником избыточного содержания гидрокарбонатов в воде городских озер является строительный мусор, которым захламлены берега озёр промзоны города Надыма. Также вероятно, что повышение концентрации гидрокарбонатов является следствием работы городского домостроительного комбината в прошлом, загрязнявшему близлежащую территорию цементной пылью.

Основным источником поступления нефтепродуктов в воды озер города являются поверхностные стоки с территорий гаражных кооперативов и свалок, расположенных в непосредственной близости (практически на берегах озер).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования нами получены следующие выводы:

1. Территория Надымского района расположена в зоне массивно-островного распространения многолетней мерзлоты, что в сочетании большим количеством выпадающих атмосферных осадков и равнинной территорией обуславливает широкое распространение термокарстовых озёр.

2. Особенности геохимии термокарстовых озер являются: ультрапресный состав вод, низкие показатели рН, низкие значения удельной электропроводности.

3. Анализ морфометрических характеристик изученных озер показал, что все озера по площади зеркала относятся к категории «очень малое», имеют очень малые глубины. По значению показателя емкости озера имеют параболоидную форму котловины.

4. Анализ геохимии поверхностных вод и донных отложений фоновых и городских озер термокарстового генезиса показал следующее:

a. Вода городских озер отличается значительно более высокой общей минерализацией по сравнению с фоновыми (52,67 и 17,78 мг/дм³), меньшими значениями сухого остатка.

b. Отмечается достоверное более низкое содержание в поверхностных водах фоновых озер по сравнению с городскими таких ионов как HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ , вследствие его происходит изменение кислой реакции среды на нейтральную.

c. Городские озера содержат меньшее количество органического углевода по сравнению с фоновыми озерами.

d. Содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях городских озер значительно превосходит аналогичные значения для фоновых: более чем в 4 и 11 раз соответственно.

5. Факторы формирования геохимических особенностей озерных вод города Надыма:

а. Более высокая минерализация вод городских озер по сравнению с фоновыми объясняется поступлением растворимых солей с поверхностным стоком загрязненных вод с прилегающей к озерам захламлённой и застроенной территории.

б. Эффект повышения щелочности вод городских озер напрямую связан с абсолютным преобладанием гидрокарбонатов, по сравнению с анионами сильных кислот – хлоридами, сульфатами, фосфатами и нитратами, основным источником избыточного содержания гидрокарбонатов в воде городских озер является строительный мусор, которым захламлены берега озёр промзоны города Надыма. Также вероятно, что повышение концентрации гидрокарбонатов является следствием работы городского домостроительного комбината в прошлом, загрязнявшему близлежащую территорию цементной пылью.

с. Основным источником поступления нефтепродуктов в воды озер города являются поверхностные стоки с территорий гаражных кооперативов и свалок, расположенных в непосредственной близости (практически на берегах озер).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Книжные издания

1. Holocene Thermokarst Lake Dynamics in Northern Interior Alaska: The Interplay of Climate, Fire, and Subsurface Hydrology. *Front. Earth Sci.* / Anderson L, Edwards M, Shapley M. [et al.]. 2019.
2. Keller K., Blum J. D., & Kling G. W. Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in an arctic watershed. *Chemical Geology*, 273(1-2), 2010. p. 76-81.
3. Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: Recent advances on its cycling and fate. / Chételat J., Amyot M., Arp P. [et al.]. *Science of the total environment*, 509, 2015. p. 41-66.
4. Michiel H. in 't Zandt, Liebner S., Cornelia U. W. Roles of Thermokarst Lakes in a Warming World, *Trends in Microbiology*, Volume 28, Issue 9, 2020. p. 769-779.
5. Physical and chemical characteristics of lakes across heterogeneous landscapes in arctic and subarctic Alaska / Larsen A. S., O'Donnell J. A., Schmidt J. H. [et al.]. *JGR: Biogeosciences*, 122(4), 2017. p. 989-1008.
6. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect / Steeneveld G. J., Koopmans S., Heusinkveld B. G. [et al.]. *Landscape and Urban Planning*, 121, 2014. p. 92-96.
7. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems / Vonk J. E., Tank S. E., Bowden W. B. [et al.]. *Biogeosciences*, 12(23), 2015. p. 7129-7167.
8. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes / Kokelj S. V., Jenkins R. E., Milburn D. [et al.]. Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(4), 2005. p. 343-353.

9. The restorative health benefits of a tactical urban intervention: an urban waterfront study / Roe J., Barnes L., Napoli N. J. [et al.]. *Frontiers in Built Environment*, 5, 2019. p. 71.
10. The role of the global cryosphere in the fate of organic contaminants / Grannas A., Bogdal C., Hageman K. [et al.]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(6), 2013. p. 3271-3305.
11. West J.J., Plug L.J. Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 113, 2015. p. 1-14.
12. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика». 2004. 304 с.
13. Веремеева А.А. Формирование и современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки: специальность 25.00.25, дис. канд. геогр. наук. Пушино, 2017. 134 с.
14. Геокриологический прогноз для Западно-Сибирской газоносной провинции / Гречищев С.Е., Москаленко Н.Г., Шур Ю.Л. [и др.]. Новосибирск: Наука, 1983. 182 с.
15. Геокриология СССР. Западная Сибирь / [В. Т. Трофимов, Ю. К. Васильчук, В. В. Баулин и др.]; под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 453 с.
16. Демидова В.Р. Геоэкологические и морфометрические характеристики малых термокарстовых озёр Тазовского полуострова: специальность 05.04.06, дис. магистерская диссертация. Тюмень, 2019. 85 с.
17. Демидова В.Р., Соромотин А.В., Приходько Н.В. Морфометрические и физико-химические особенности малых термокарстовых озер Тазовского района ЯНАО / Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II 5 Международной конференции (19-24 мая 2019 г.). Казань: Издательство Академии наук РТ, 2019. – Ч. 1. – с. 63-65
18. Демидова В.Р., Соромотин А.В., Приходько Н.В. Характер фонового распределения тяжелых металлов в водах малых термокарстовых озер Тазовского полуострова (по результатам статистического анализа): Сборник

докладов XXI Международной научно-практической конференции. Том I. Тюмень: ТИУ, 2019.- с. 347-351

19. Ершов Э.Д. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
20. Ершов Э.Д. Общая геокриология. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.
21. Иванова И.С. Нормальные алканы и изопреноидные углеводороды в воде термокарстового озера Большеземельской тундры. / Иванова И.С., Король И.С., Широкова Л.С., Покровский О.С. Подземные воды востока России. 2018. с. 213 – 217.
22. Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Т.2. Западная Сибирь. / Под ред. Е.М. Сергеева М., Изд-во Московского университета, 1989. 498 с.
23. Каллистова А. Ю., Савичев А. С., Русанов И. И., Пименов Н. В. Термокарстовые озера – экосистемы с интенсивными микробными процессами цикла метана / Микробиология. 2019. Т. 88, № 6, с. 631-644.
24. Кирпотин С.Н. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления / Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Вестник Томского государственного университета. 2008. № 133. с. 185–189.
25. Кирпотин С.Н., Полищук В.Ю. Прогнозирование динамики термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты на основе космических снимков и математического моделирования / BioClimLand (Biota, Climate, Landscapes). 2013. № 1. с. 48-57.
26. Коломоец С. С. Исследование электрофизических свойств воды термокарстовых озер Ямало-Ненецкого автономного округа / С. С. Коломоец, В. И. Суляев // Труды Пятнадцатой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, Томск. 2018. с. 328-331.
27. Кондратьева К.А. Объяснительная записка к геокриологической карте СССР масштаба 1:2500000 / Кондратьева К.А., Дунаева Е.Н., Труш Н.И., Гаврилов А.В., Афанасьенко Е.В., Хруцкий С.Ф., Ершов Э.Д. [и др.]. Министерство геологии СССР ПГО "Гидроспецгеология". 1991. 126 с.

28. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты / Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 3. с. 33-42.
29. Кремлева Т.А. Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав / Кремлева Т.А., Моисеенко Т.И., Хорошавин В.Ю., Шавнин А.А. Вестник Тюменского государственного университета. №12, 2012 г. с. 80 – 89.
30. Кудрявцев В.А. О термокарсте / Вопросы физической географии полярных стран. Вып.1. М.: МГУ, 1958. с. 101–106.
31. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
32. Манасыпов Р.М. Биогеохимические особенности экосистем термокарстовых озер субарктики Западной Сибири: автореф. дис. канд. биол. наук. Томский гос. университет. Томск. 2013.
33. Манасыпов Р. М. Донные отложения термокарстовых озер плоскобугристых болот севера Западной Сибири / Р. М. Манасыпов, А. Г. Лим / Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: материалы Третьей международной научно-практической конференции. Томск, Россия. Томск. 2015. с. 43-45.
34. Манасыпов Р.М. Особенности элементного состава озерных вод и макрофитов термокарстовых экосистем субарктики Западной Сибири / Манасыпов Р.М., Кирпотин С.Н., Покровский О.С., Широкова Л.С.: Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3 (19). с. 186-198.
35. Манасыпов Р.М. Термокарстовые озерные воды в зонах вечной мерзлоты Западной Сибири / Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н., Зиннер Н.С.: Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Криосфера. 2014. Том 8. с. 1177-1193.
36. Манасыпов Р.М. Элементный состав макрофитов термокарстовых озер Западной Сибири / Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н., Зиннер

Н.С.: Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 8. с. 50-65.

37. Моисеенко Т. И. Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в гумидных регионах. / Моисеенко, Т. И., Гашкина, Н. А., Дину, М. И., Хорошавин, В. Ю., Кремлева, Т. А.: Геохимия. 2017. с. 41-56.

38. Порфирьева А.В. Гидрохимический анализ: учеб. пособие / Порфирьева А.В., Зиятдинова Г.К., Медянцева Э.П. [и др.]. Казань: Изд-во Казан. унта. 2018. с. 88.

39. Покровский О.С. Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири. / Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н.: Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. №3. с. 199-217.

40. Родионова Т.В. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: 25.00.03, дис. канд. геогр. наук. М., 2013. 196 с.

41. Санников Г.С. Изменения морфометрических показателей термокарстовых озёр западного Ямала как индикатор динамики геологической среды и её реакции на техногенное воздействие (на примере Бованенковского месторождения): специальность 25.00.08, дис. канд. геолого-минералогических наук. Тюмень. 2016. 157 с.

42. Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М.: Наука, 1979.- 280 с.

43. Хабибуллин И.Л. Моделирование термокарстового озера и оценка его экогеокриологической опасности / Хабибуллин И.Л., Лобастова С.Л., Солдаткин М.В., Бураншина А.Р.: Вестник Башкирского университета. 2007. Т. 12. № 1. С. 21-22.

44. Шигапов И. С. Особенности формирования и развития малых озер урбанизированных территорий: на примере города Казани: специальность 25.00.36, дис. канд. геогр. наук., М., 2014. 170 с.

45. Шур Ю. Л. Термокарст (к теплофизическим основам учения о закономерностях развития процесса). М., «Недра». 1977. 80 с.

Электронные издания

46. John C. D. Response of Periglacial Geomorphic Processes to Global Change, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier (2020). ISBN 9780124095489, URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00012-2>. (date of request: 04.05.2021).

47. Паспорта специальностей выпускной аттестационной комиссии [сайт] URL: <https://teacode.com/online/vak> (дата обращения: 03.05.2021).

ПРИЛОЖЕНИЯ 1 - 10



Рис. 1. Фото озера Ф1 [фото автора]



Рис. 2. Фото озера Ф2 [фото автора]



Рис. 3. Фото озера Ф3 [фото автора]



Рис. 4. Фото озера Г1 [фото автора]



Рис. 5. Фото озера Г2 [фото автора]

Батиметрическая карта-схема озера Ф1

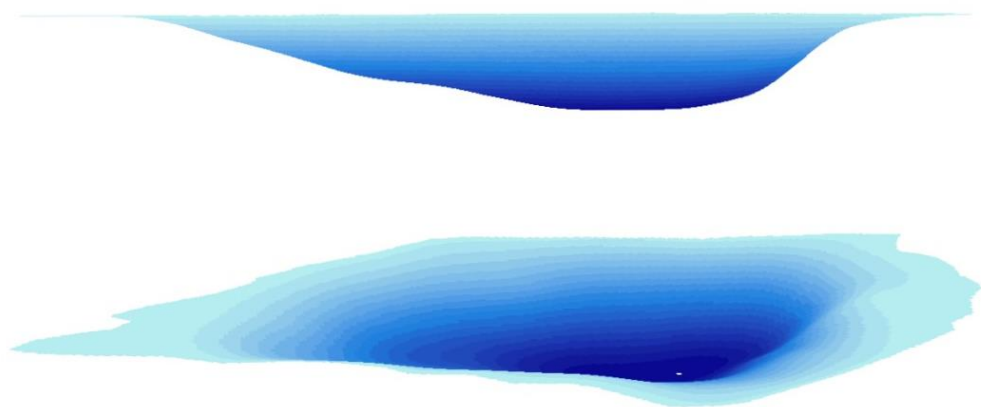
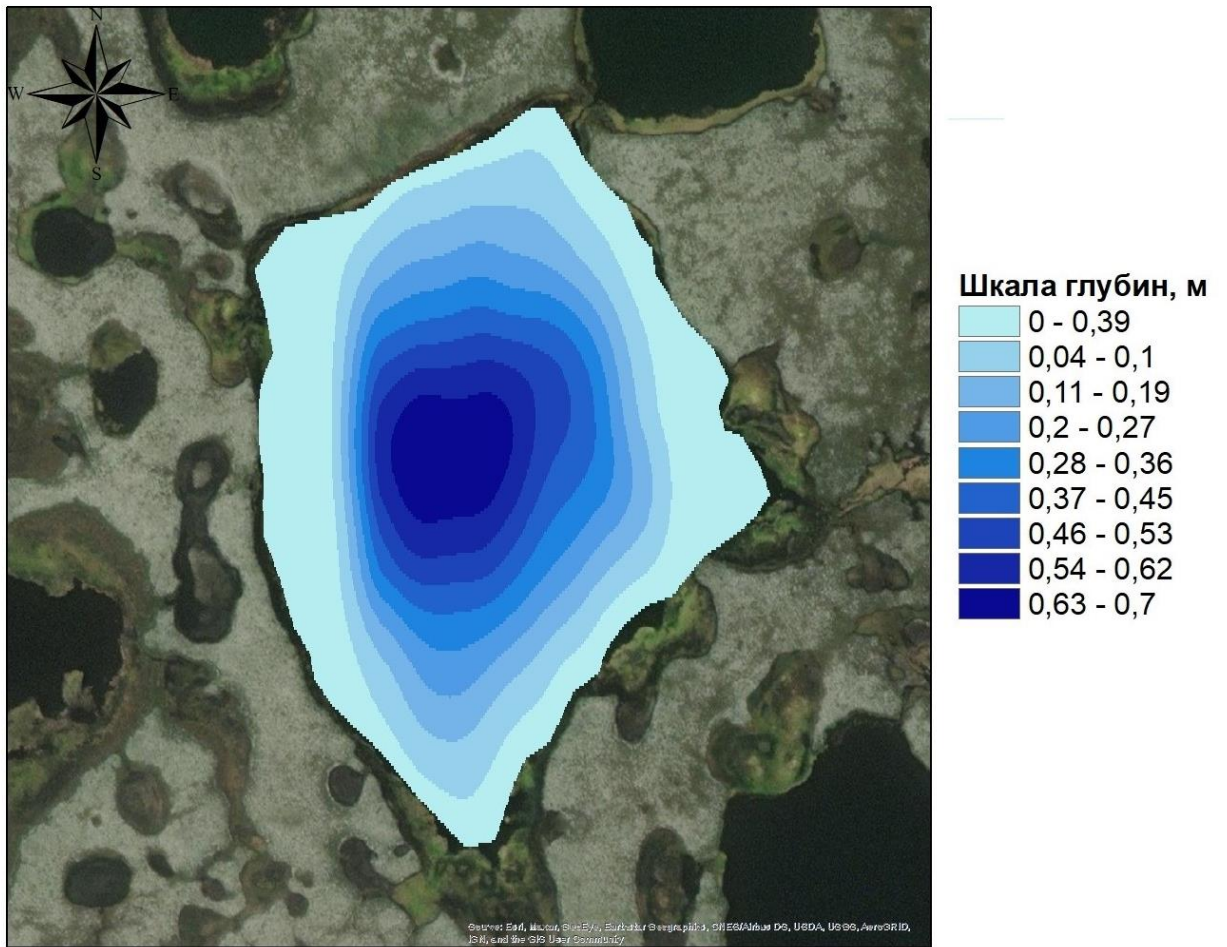
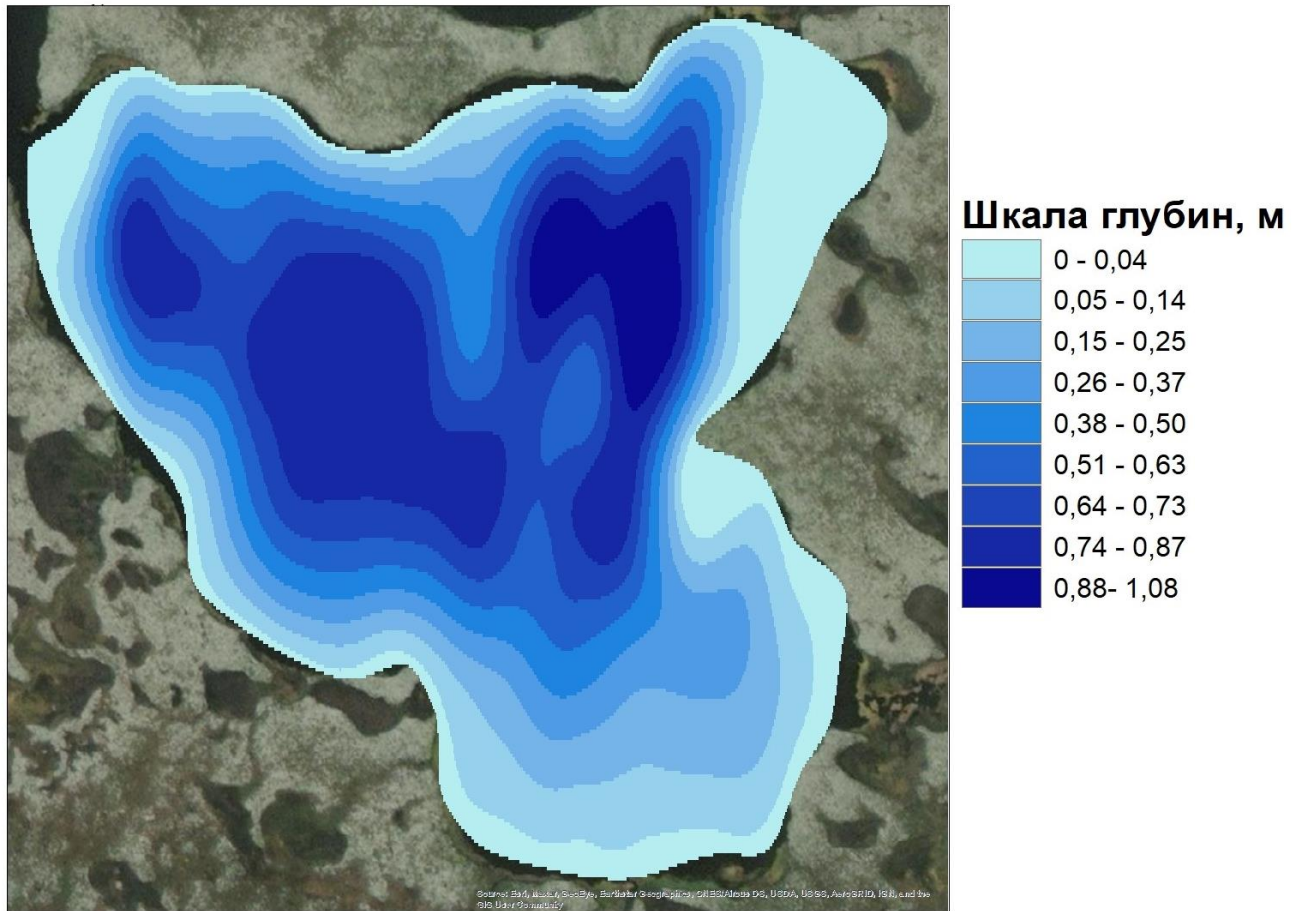


Рис. 6. Батиметрическая карта-схема озера Ф1 [составлено автором]

Батиметрическая карта-схема озера Ф2



1:3 500

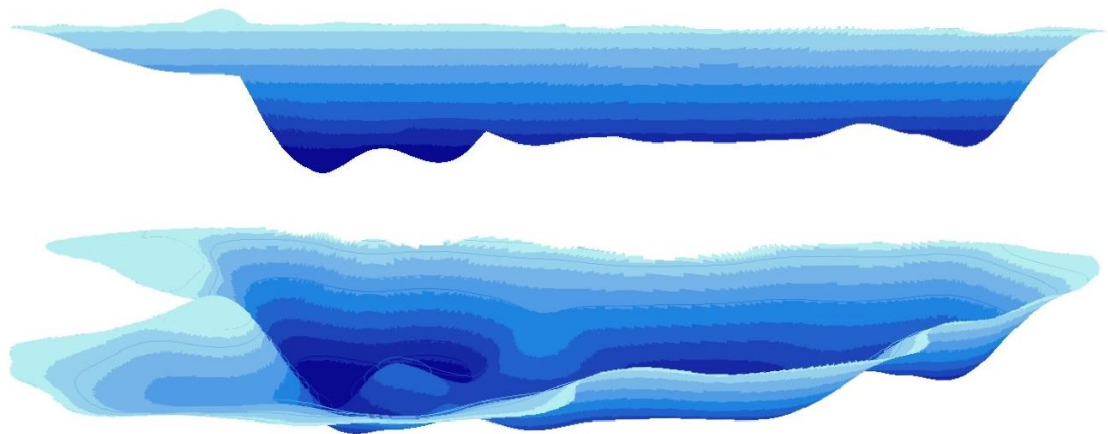
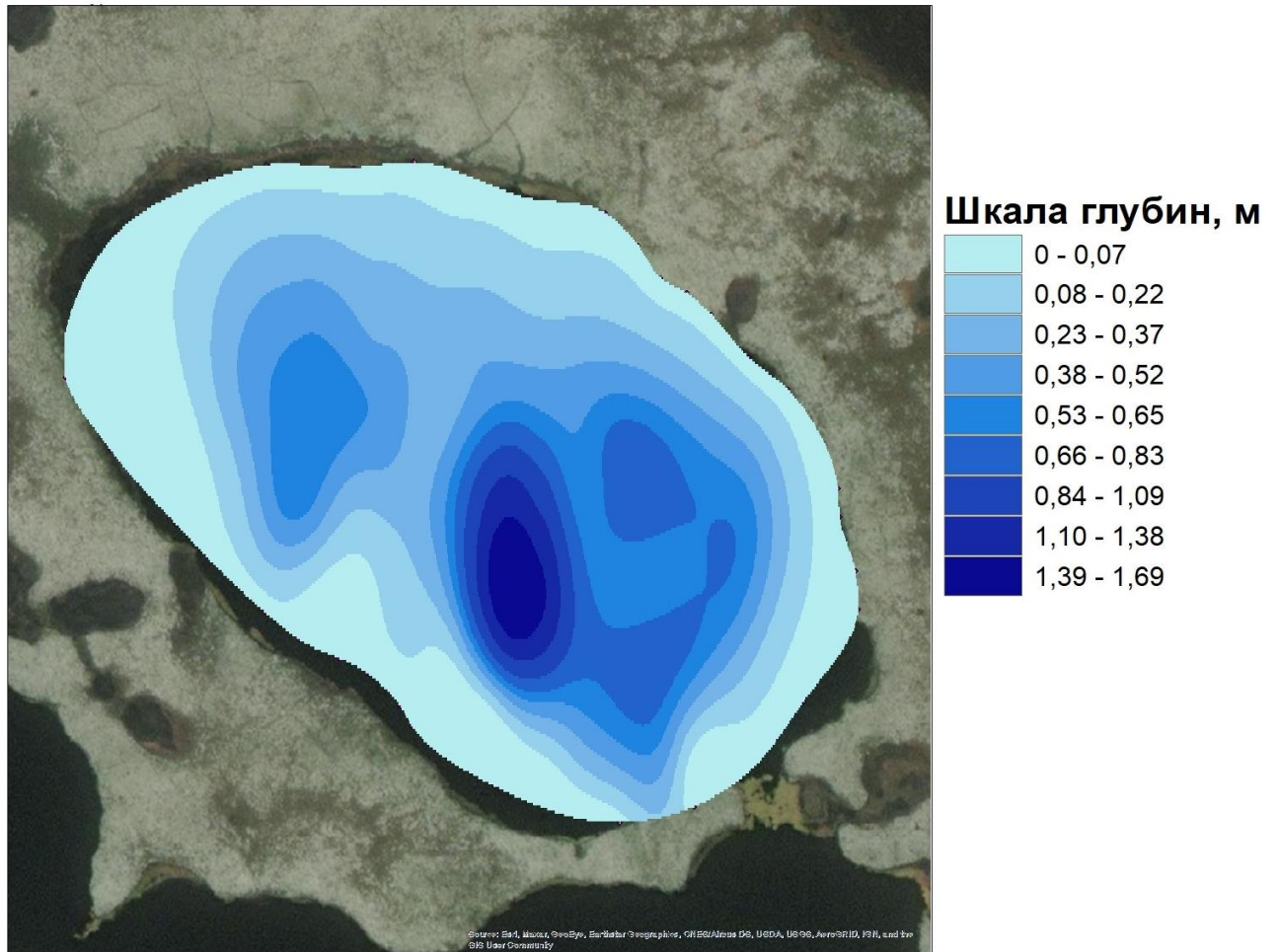


Рис. 7. Батиметрическая карта-схема озера Ф2 [составлено автором]

Батиметрическая карта-схема озера Ф3



1:3 500

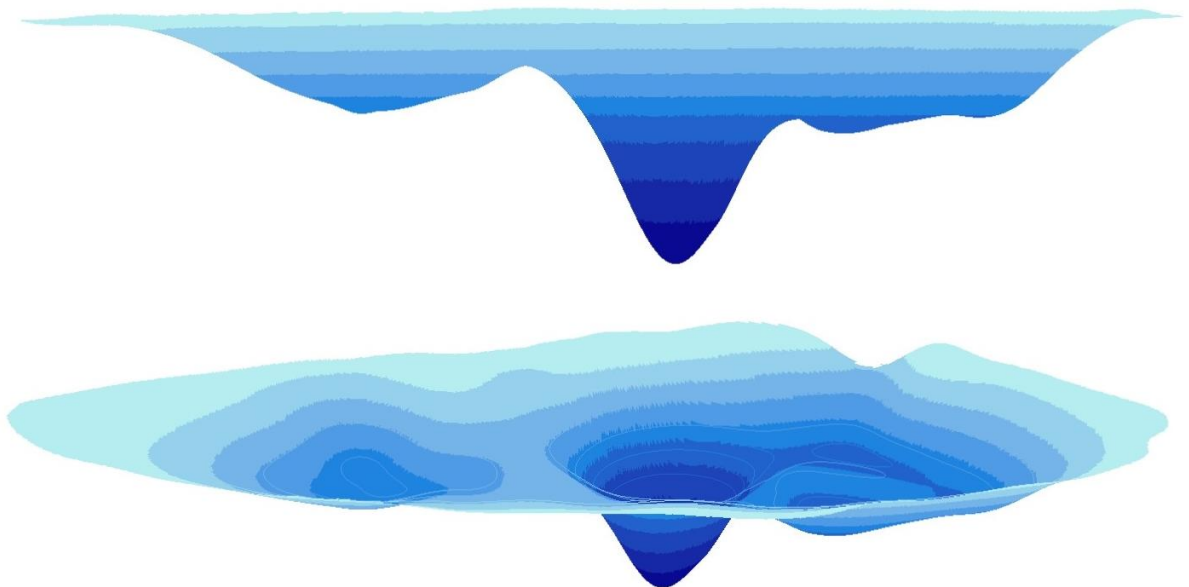
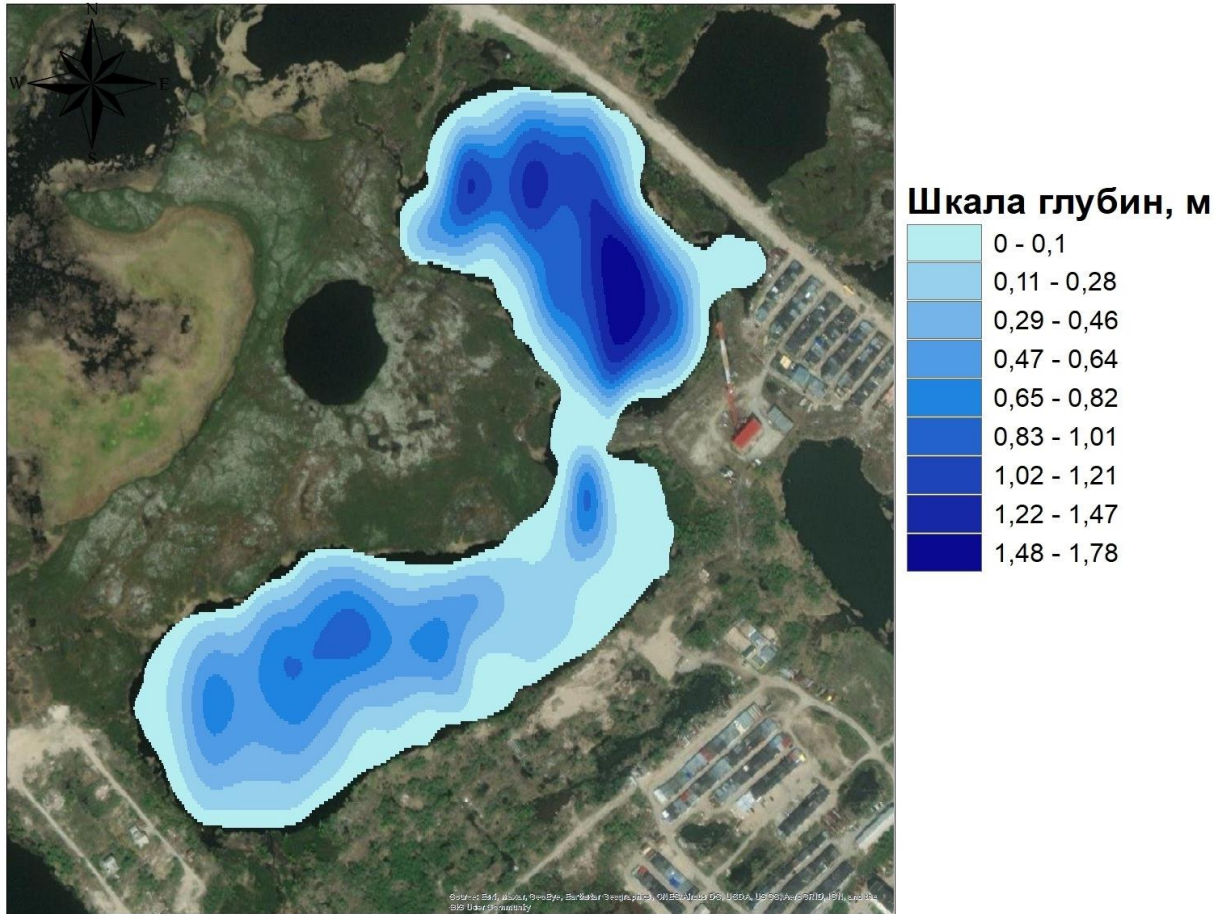


Рис. 8. Батиметрическая карта-схема озера Ф3 [составлено автором]

Батиметрическая карта-схема озера Г1



1:7 500

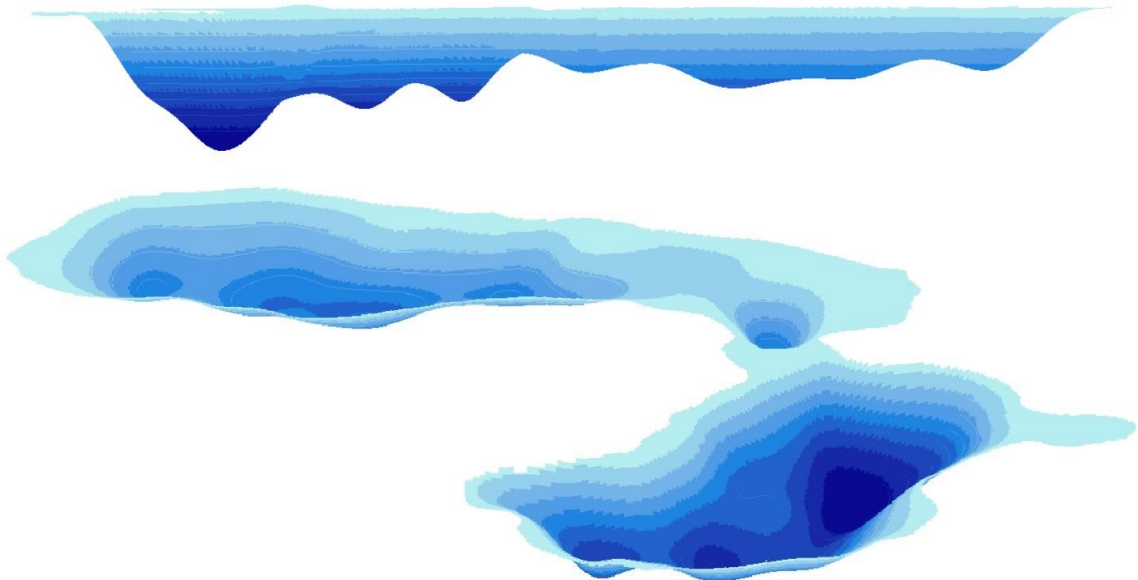


Рис. 9. Батиметрическая карта-схема озера Г1 [составлено автором]

Батиметрическая карта-схема озера Г2

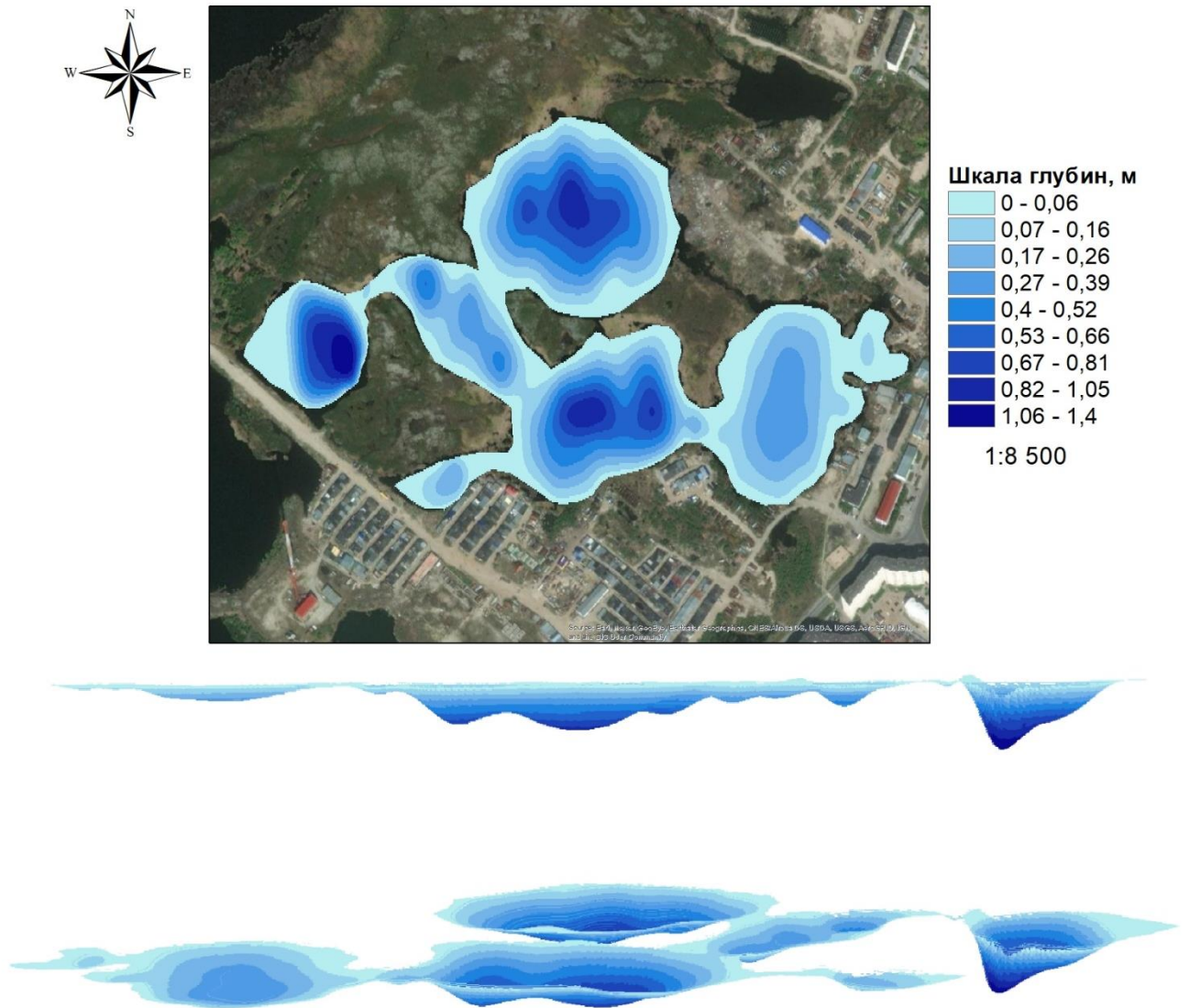


Рис. 10. Батиметрическая карта-схема озера Г2 [составлено автором]