

Российская Федерация  
Ямало-Ненецкий автономный округ  
Государственное автономное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа  
«Научный центр изучения Арктики»

ISSN 2587-6996 (печатное издание)  
ISSN 2782-5442 (электронное издание)



№ 4 (121)

октябрь-декабрь

# НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК Ямало-Ненецкого автономного округа

Scientific Bulletin  
of the Yamal-Nenets  
Autonomous District

---

Salekhard 2023

Научный журнал  
Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа  
Издается с 1999 года по инициативе Правительства Ямало-Ненецкого  
автономного округа  
В год 4 номера

**Главный редактор**

В.С. Исаев – канд. геол.-минерал. наук, Научный центр изучения Арктики (Салехард, Россия).

**Редакционная коллегия:**

Е.В. Абакумов – д-р биол. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета (Санкт-Петербург, Россия);

В.Д. Богданов – д-р биол. наук, член-корреспондент РАН, Институт экологии растений и животных УрО РАН (Екатеринбург, Россия);

Ю.К. Васильчук – д-р геол.-минерал. наук, действительный член РАЕН, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

Е.А. Вознесенский – д-р геол.-минерал. наук, профессор, институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (Москва, Россия);

С.Н. Гашев – д-р биол. наук, профессор Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия);

А.В. Головнев – д-р ист. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Музей антропологии и этнографии им. Петра Великого (Кунсткамера) РАН (Санкт-Петербург, Россия);

А.А. Егоров – канд. биол. наук, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия);

В.В. Кириллов – канд. биол. наук, Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия);

Р.А. Колесников – канд. геогр. наук, Научный центр изучения Арктики (Салехард, Россия);

И.А. Комаров – д-р геол.-минерал. наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

Ю.П. Курхinen – д-р биол. наук, профессор, Университет Хельсинки (Финляндия), Карельский научный центр РАН (Россия);

Е.Н. Моргун – канд. биол. наук, Научный центр изучения Арктики (Салехард, Россия);

Д.В. Московченко – д-р геогр. наук, Тюменский научный центр СО РАН (Тюмень, Россия);

А.Н. Пилясов – д-р геогр. наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

А.В. Соромотин – д-р биол. наук, профессор Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия);

В.Е. Тумской – д-р геол.-минерал. наук, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, Россия);

А.В. Хорошев – д-р геогр. наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

Л.Н. Хрусталева – д-р техн. наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

С.Р. Чалов – д-р геогр. наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

Д.В. Черных – д-р геогр. наук, Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия);

Г.Ю. Ямских – д-р геогр. наук, профессор Сибирского федерального университета (Красноярск, Россия).

**Редакция:**

В.В. Пономарев – зам. главного редактора, Научный центр изучения Арктики;

Е.А. Сухова – корректор, Научный центр изучения Арктики.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

---

**Демидов Н.Э.**

Из опыта бурения мерзлых пород  
в Арктике и Антарктике малогабаритными установками  
в научно-исследовательских целях ..... 6

**Шеин А.Н. , Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Леопольд Я.К.**

Теплотехнические расчёты для оснований двух зданий  
в г. Салехард с учётом температурного мониторинга  
мёрзлых грунтов ..... 21

**Паламарчук В.А., Башкова А.А.**

Первые результаты организации гидрогеологического мониторинга  
на территории г. Салехарда в летний период 2023 г. .... 37

**Губарев А.С., Сеницкий А.И., Ребенков В.Ф.**

Изучение специфических факторов формирования  
температурного поля под зданиями на застроенной территории ..... 55

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРКТИКЕ

---

**Тупахин Д.С.**

Сравнительный анализ топографической съёмки местности  
при помощи методов тахеометрии и фотограмметрии  
в археологических исследованиях ..... 74

## **ГЕОЭКОЛОГИЯ**

---

**Семчуков А.Н., Кириллов В.В.**

Математическое моделирование термохалинного режима Обской губы с помощью программного комплекса Delft3D: сравнение результатов расчета с натурными данными ..... 84

**Гузева А.В., Демидов Н.Э., Лапенков А.Е.**

Строение гуминовых кислот и условия гумификации в донных отложениях озер Полярного Урала и ямальской тундры ..... 100

## **ЭКОЛОГИЯ**

---

**Исаев В.С., Моргун Е.Н., Абакумов Е.В., Егоров А.А., Антипов А.Ю., Каширина Е.С., Окоэтто М.Н., Кукуричкин Г.М., Попов А.С., Ли С., Низамутдинов Т.И., Кибенко В.А., Лукьяненко Д.А., Авдащенко М.В., Булекешев С.Ш.**

Резолюция по круглому столу «Озеленение городских пространств в условиях Арктики» в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене» ..... 122

**ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ,  
МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ**

---

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 551.341

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.001

### ИЗ ОПЫТА БУРЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ МАЛОГАБАРИТНЫМИ УСТАНОВКАМИ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕЛЯХ

*Никита Эдуардович Демидов*

*Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

*nikdemidov@mail.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены технические возможности и ограничения использования малогабаритных установок применительно к бурению научных скважин в мерзлых породах. Приводятся примеры бурения скважин в различных горно-геологических условиях Арктики и Антарктики.

**Ключевые слова:** бурение, буровая установка, скважина, мерзлота, Арктика, Антарктида.

**Цитирование:** Демидов Н.Е. Из опыта бурения мерзлых пород в Арктике и Антарктике малогабаритными установками в научно-исследовательских целях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 6–20. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.001.

Original article

**EXPERIENCE OF SCIENTIFIC SMALL-SCALE DRILLING OF  
PERMAFROST IN ARCTIC AND ANTARCTIC**

***Nikita E. Demidov***

*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

*nikdemidov@mail.ru*

***Abstract.*** Advantages and limitations of the technique for making scientific boreholes in permafrost are discussed with review of particular examples of drilling in different geological conditions of Arctic and Antarctic.

***Keywords:*** drilling, drill rig, borehole, permafrost, Arctic, Antarctic.

***Citation:*** Demidov E.N. Experience of scientific small-scale drilling of permafrost in Arctic and Antarctic // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 6–20 doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.001.

### ***Введение***

Бурение скважин в мерзлоте является одной из распространенных составляющих научных исследований на побережье Северного Ледовитого океана, арктических архипелагах и в свободных ото льда оазисах Антарктиды. Скважины бурятся главным образом в целях получения кернов для изучения особенностей строения и состава мерзлых толщ и реконструкции условий их осадконакопления. Керны даже из неглубоких скважин (10–25 м) в лучшей степени характеризуют отложения, чем образцы из обнажений, поскольку последние, находясь на или близ поверхности, подвергаются разуплотнению, растеплению, дегазации и влиянию атмосферных осадков. С помощью скважин можно получать информацию об отложениях, находящихся ниже уровня дрен (морей, озер, рек), что принципиально невозможно сделать путем исследования обнажений. Только с помощью опущенной в скважину термокося можно измерять температуру, которая является неотъемлемой частью геокриологической характеристики отложений. Экспедиционный характер этих работ выдвигает серьезные ограничения в отношении габаритов и массы используемых буровых станков. Малогабаритные станки не только выигрывают в плане возможности их транспортировки в труднодоступные районы, но и существенно в меньшей степени по сравнению со станками тяжелой серии оказывают воздействие на ранимый деятельный слой. Нарушение деятельного слоя запрещено как в Арктике, так и в Антарктике, и недопустимо как с точки зрения ущерба окружающей среде, так и искажения температурного поля при обустройстве термометрических скважин.

Сходный спектр задач при бурении решается в ходе инженерно-геологических изысканий и обустройстве скважин геотехнического мониторинга. В России требования к бурению скважин в мерзлых грунтах, полевому описанию и отбору образцов при выполнении инженерно-геологических изысканий регламентируются соответствующими государственными стандартами [1-3]. На площадках проектируемых и существующих сооружений экологические ограничения менее строгие, и зачастую предпочтение отдается станкам тяжелой серии из-за их высокой производительности. Малогабаритные станки здесь также применяются (преимущественно на линейных объектах), но опыт бурения мерзлоты, полученный производственными организациями, редко находит свое отражение в периодических изданиях. Важным исключением из этого правила стоит считать рекомендации по бурению скважин в мерзлых грунтах при производстве инженерно-геологических изысканий для строительства, разработанные и изданные Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве [4].

Потепление климата, которое в Арктике носит наиболее быстрые темпы на планете и уже также регистрируется на Антарктическом полуострове, потребует в ближайшие годы нарастить темпы научно-исследовательского бурения и организации пунктов мониторинга мерзлоты. В России это уже находит отражение в формировании Росгидрометом государственной сети мониторинга состояния многолетней мерзлоты [5] и в создании региональных сетей, как, например, в ЯНАО [6]. Бурение льдосодержащих пород является также одной из перспективных задач в исследовании высоких широт Марса и вечно затененных кратеров на полюсах Луны. Различные портативные буровые установки для этих целей проходили полевое тестирование на острове Девон в канадской Арктике и оазисе Сухие долины в Антарктиде [7].

В гляциологии конструктивные особенности установок для бурения льда освещаются в ведущих профильных периодических изданиях, таких как *Journal of Glaciology* и *Annals of Glaciology*, проводятся международные симпозиумы по технологии бурения льда. В мерзлотоведении подобной практики обмена опытом не сложилось. Данная статья является попыткой обобщения опыта бурения научно-исследовательских скважин малогабаритными установками в различных горно-геологических условиях криолитозоны. В задачи исследования входило рассмотрение преимуществ и ограничений применения методов бурения мерзлоты «всухую», с промывкой и с продувкой.

### *Материалы и методы*

В статье анализируется процесс бурения скважин, осуществлявшийся главным образом в экспедициях Арктического и антарктического науч-

но-исследовательского института (г. Санкт-Петербург), Российской антарктической экспедиции, Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (г. Пущино), Научного центра изучения Арктики (г. Салехард) и норвежского университета UNIS (University Centre in Svalbard, Норвегия). Рассмотрены примеры бурения установками УКБ 12/25 (ООО «Машиностроительный завод им. В.В. Воровского», Россия), УКБ 12/25И (ООО «Машиностроительный завод им. В.В. Воровского», Россия), «Белка» (ООО «Объединенные заводы буровой техники им. В.В. Воровского», Россия), «Термит» (ООО НПО «Геммаш», Россия), UNIS Permafrost Drill Rig (Dipl.-Ing. Lutz Kurth Bohr- und Brunnenausüstungen GmbH совместно с Kolibri Geo Services, Германия) в оазисах Антарктиды, на Шпицбергене, Ямале, Земле Франца-Иосифа, Новосибирских островах и в других полярных районах. Более подробно с природными условиями этих районов и характеристикой отложений можно ознакомиться по приведенным в тексте ссылкам. Сравнительный анализ эффективности применения разных методов проведен на качественном уровне. В статье также используются такие количественные критерии, как скорость бурения, проходка за рейс, вес бурового комплекта.

### *Колонковое бурение «всухую»*

Дисперсные породы, подвергшиеся промерзанию, являются сложной многокомпонентной средой, состоящей в первом приближении из минеральных агрегатов разного размера, льда-цемента и скоплений льда в виде шлиров. Эти основные составляющие могут находиться в породе в разной пропорции, возможны также включения крупных скальных обломков, незамерзшего рассола, органических грунтов, крупных прослоев льда и ледогрунта. Кроме того, свойства мерзлых пород и фазовый состав содержащейся в них влаги являются функцией температуры, которая меняется как вследствие естественного изменения температурного поля по глубине, так и при механическом воздействии на забой скважины во время бурения. Все это осложняет понимание, физическую формализацию и моделирование процессов, происходящих на забое скважины. Ниже рассматриваемые методики бурения являются результатом накопленного эмпирическим путем опыта работы в Арктике и Антарктике.

Колонковое бурение «всухую» – основной метод, применяемый для проходки мерзлых дисперсных пород. Отказ от использования промывки и продувки уменьшают вес бурового оборудования и требования к его энерговооруженности, что имеет важное значение в экспедиционной логистике. Буровые насосы для проходки неглубоких скважин могут иметь относительно небольшой вес, но промывка результируется в растеплении ствола скважины и кернов и поэтому исключена при бурении дисперсных

пород. Продувка приводит к растеплению в меньшей степени по сравнению с промывкой, но ввиду большой массы компрессоров и генераторов, а также их дороговизны, к этому методу, как правило, прибегают только при необходимости проходки скальных грунтов.

В теории бурения любой применяемый метод описывается с позиции решения трех задач: разрушения породы инструментом на забое скважины, извлечения разрушенной породы из скважины и поддержания стабильности стенок скважины. Последняя задача при бурении мерзлоты «всухую» не имеет особой сложности, так как мерзлые породы благодаря наличию льда-цемента не обваливаются и хорошо держат ствол скважины.

Если бурение проводится во время формирования сезонно-талого слоя (СТС), то по возможности следует выбирать точку бурения так, чтобы избежать подтока надмерзлотных вод СТС в скважину, например, на

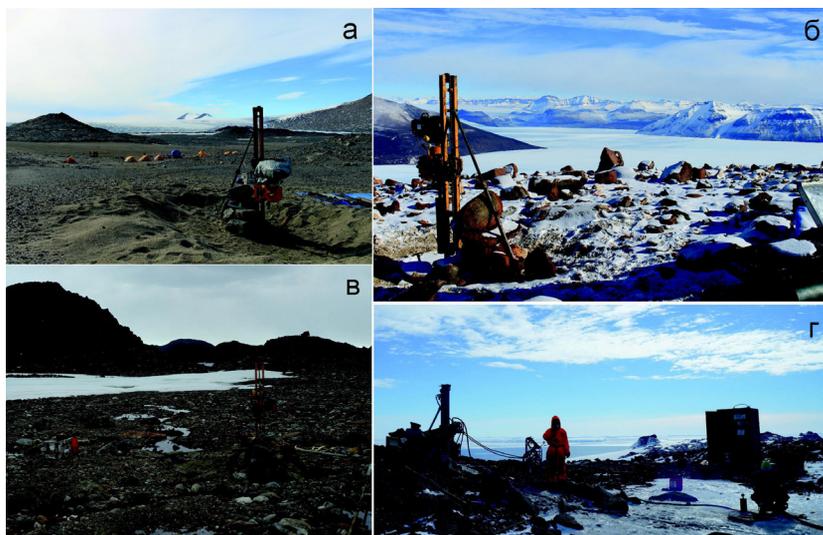


Рис. 1. Бурение малогабаритными установками в оазисах Антарктиды:

**а** – буровая установка УКБ 12-25И в долине Райта, оазис Сухие долины. Буровая пригружена валунами и стоит в шурфе на поверхности мерзлоты. Сухой песок («сухая мерзлота») мощностью 40 см был предварительно снят. Температура на забое скважины  $-14,5^{\circ}\text{C}$ ;

**б** – буровая установка УКБ 12-25И на Столовой горе, оазис Сухие долины. Буровая пригружена валунами и стоит в шурфе на поверхности мерзлоты. Сухой песок с валунами («сухая мерзлота») мощностью 20 см был предварительно снят. Температура на забое скважины  $-23^{\circ}\text{C}$ ;

**в** – буровая установка УКБ 12-25 в оазисе Бангера. Валуны встречены лишь вблизи поверхности и были предварительно убраны руками из СТС перед установкой кондуктора. Температура на забое скважины  $-9,4^{\circ}\text{C}$ ;

**г** – буровая установка «Термит» на станции Русская. Буровая пригружена валунами, на льду озера насос НБ-1. Температура на забое скважины  $-10,5^{\circ}\text{C}$

локальном возвышении. В значительном числе случаев СТС не обсыпается и не подтапливает скважину, а значит можно обойтись без его обсадки. При работах в оазисе Сухие долины в Антарктиде [8], где верхние дециметры грунта иссушены благодаря сублимации, «сухая мерзлота» снималась лопатой и бурение проводилось непосредственно с поверхности льдосодержащих пород без кондуктора (рис. 1 а, б). При необходимости установки кондуктора скважину углубляют примерно на 0,5–1,5 м ниже СТС, вставляют трубу-кондуктор и оставляют ее на ночь, чего для случая низкотемпературных пород достаточно для смерзания со стенками скважины. Если толща дисперсных пород содержала крупные скальные обломки, то за счет выпучивания они могут концентрироваться на поверхности и близ нее, что зачастую осложняет проходку СТС. В этом случае также целесообразно предварительно выкопать шурф, установить в него кондуктор и начать бурение мерзлых пород через кондуктор. Такой способ использовался для проходки морены, перекрывающей озерно-лагунные отложения, в антарктических оазисах Холмы Ларсеманн [9] и Бангер (рис. 1 в). Бурение в разрезах с деградирующей заглубленной мерзлотой требует организации обсадки на значительную глубину. Применение в таких случаях малогабаритных установок является нецелесообразным.

При бурении мерзлоты «всухую» колонковый снаряд решает одновременно задачи разрушения и извлечения породы. При его вращении на забое происходит не только разрушение породы коронкой, но и плавление льда. По мере углубления снаряда шлам поступает по зазору между колонковой трубой и стенками скважины и через специальные окна попадает в колонковую трубу, скапливаясь над керном. Превращение льда в воду и поступление шлама через окна в колонковую трубу уменьшает трение и позволяет бурить мерзлые породы малогабаритными установками без значительной нагрузки на забой. На рис. 2 представлено фотоизображение колонковых снарядов, зарекомендовавших себя при бурении мерзлоты «всухую». Для их изготовления используется тонкостенная труба с толщиной стенки около 3 мм, что позволяет уменьшить вес снаряда. Кроме того, это позволяет снизить количество образуемого шлама, который запрессовывает снаряд, повысить выход керна и увеличить длину проходки за рейс, которая может достигать 75 см (рис. 3). Съемные коронки при такой толщине трубы изготовить проблематично, и взамен них твердосплавные резцы припаивают к торцу трубы с внутренней и внешней стороны. Используются колонковые снаряды четырех диаметров 108, 89, 73 и 63 мм. Полезная длина снарядов 75 и 50 см, вес от 1,5 до 5 кг. За один рейс проходка составляет в зависимости от типа пород от 15 до 75 см. При такой проходке керн, как правило, успевает запрессоваться шламом и оторваться. Если этого не происходит, то повторяют проходку, углубляясь ниже на 5-15 см.

Для отрыва керна можно также прибегнуть к перебуриванию интервала меньшим диаметром.

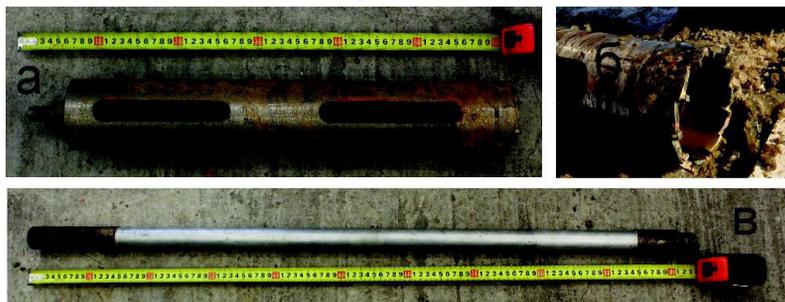


Рис. 2. Фотоизображение инструмента для бурения мерзлоты «всухую» малогабаритными установками: а – колонковый снаряд; б – коронка колонкового снаряда; в – алюминиевая штанга



Рис. 3. Керн длиной 75 см, полученный при бурении мелких песков с массивной криотекстурой и включениями щебня, перекрывающими льдонасыщенное ядро булгуньяха Вась-Юган 1 в окрестностях г. Салехарда. Температура на забое скважины  $-0,5^{\circ}\text{C}$

Оптимальным вариантом применяемых бурильных штанг являются полые штанги, изготовленные для облегчения из алюминиевых труб (рис. 2 в). На торцах труб нарезается резьба и навинчиваются стальные наконечники с выемками под подкладные вилки и с резьбами для соединения штанг между собой. По сравнению со стальными штангами вес алюминиевых штанг примерно на 25% ниже, что и определяет преимущество в использовании последних при бурении малогабаритными установками, в процессе которого спуско-подъемные операции проводятся вручную. Алюминиевая штанга длиной 1 м весит 2,2 кг. По мере углубления штанги свинчиваются в свечи по 5 м и спуско-подъемные операции проводятся путем свинчивания — развинчивания пятиметровых свечей на металлическом кольце внизу мачты с помощью подкладной вилки, г-образных или газовых ключей. Захват и подъем колонны проводится руками или с

помощью газовых ключей. Применение алюминиевых штанг позволяет проводить подъем колонны с глубины 25 м вручную без использования лебедки. Если стоит задача бурения скважины глубиной более 25 м, то после достижения данной отметки следует переходить к использованию лебедки. При использовании стальных штанг к использованию лебедки прибегают начиная с глубины 18 м.

Известно, что в связи с уменьшением количества незамерзшей воды при понижении температуры прочность мерзлых пород увеличивается. Однако фактический опыт бурения экстремально холодной по земным меркам мерзлоты в Сухих долинах Антарктиды, где температура в скважине на Столовой горе достигала  $-23^{\circ}\text{C}$ , показал, что ее сопротивляемость бурению не отличается от таковой в более теплых районах криолитозоны. Определяющее значение при бурении песчано-глинистых отложений имеет их льдистость. При низких значениях льдистости снаряд быстрее запрессовывается, увеличение давления на забой приводит лишь к незначительному углублению и нагреву керна. Низкие значения льдистости, как правило, не характерны для верхних метров разреза и могут быть встречены с глубины 5-10 м. Так, при бурении слабольдистых песков на восточном побережье Обской губы на полуострове Явай [10] проходка за рейс составляла не более 15 см. Низкая проходка за рейс может существенно увеличить трудоемкость и снизить скорость бурения скважины. На рисунке 4 показана зависимость глубины забоя от количества рейсов («забурок») при разной величине проходки за рейс.

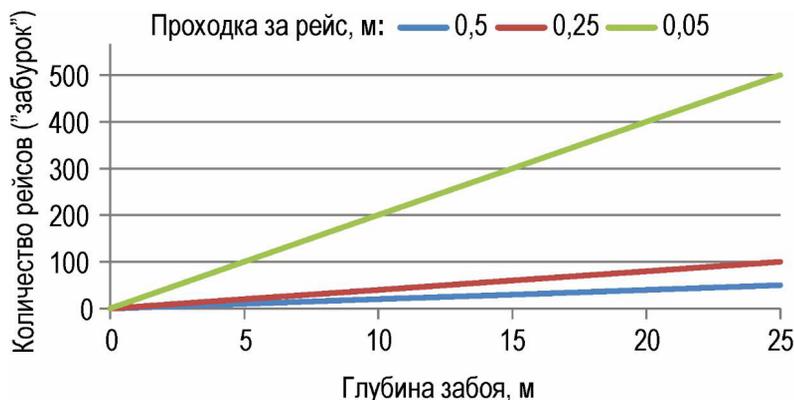


Рис. 4. Зависимость глубины забоя от количества рейсов («забурок») при разной величине проходки за рейс

Фактор температуры нужно принимать во внимание с точки зрения возможности приморозки бурового инструмента во время остановок его вращения. В случае непредвиденных остановок необходимо поднять инструмент над забоем и периодически его проворачивать или полностью

извлечь его из скважины, чтобы он не примерз к стенкам. При бурении низкотемпературной мерзлоты эти операции необходимо делать незамедлительно.

Выход керна и его качество помимо типа буримой породы определяется толщиной стенки колонковой трубы (чем тоньше стенка, тем лучше керн) и ее диаметром (чем больше диаметр, тем лучше керн), поэтому если колонковую трубу не подклинивает при спуско-подъемных операциях, то переходить на бурение меньшим диаметром нецелесообразно. В отдельных случаях получается пройти скважину, используя только колонковые трубы диаметром 108 мм. Таким образом, например, была пробурена скважина глубиной 25 м в долине Грендален на архипелаге Шпицберген. Скважиной вскрыт разрез мерзлых суглинков и алевролитов с прослоями льда мощностью до 1 м, перекрытых гравием с суглинистым заполнителем [11]. Из колонковой трубы керн выдавливается монтировкой или выбивается ударами молотка по стальному стержню. Для удобства извлечения и упаковки керн может быть разделен зубилом на части. При зимнем бурении может понадобиться разводить костер или использовать горелку для прогрева колонковой трубы перед извлечением керна.

Значительное сопротивление бурению оказывают скальные и полускальные грунты, лед, мерзлый торф. Отдельная галька и небольшие валуны даже таких крепких пород, как гранит, гнейс, базальт, за счет их трещиноватости и выветрелости поддаются колонковому бурению «всухую». Массивы этих пород оказывается возможным пройти на глубину 0,5 — 2 м. Причем, если позволяет научная задача, стоящая перед бурением, проходку скальных грунтов в некоторой степени можно облегчить путем подлива в скважину пресной воды или рассола [12]. Глубже эти породы, как правило, отличаются низкой степенью выветрелости и поэтому могут разбуриваться только с применением продувки или промывки. Проходка валунов и тем более массивов скальных грунтов ведет к быстрому истиранию твердосплавных резцов и их отрыву. Массивы полускальных грунтов — аргиллитов, алевролитов, известняков — бурятся легче, но и их проходка малогабаритными установками «всухую» целесообразна только в исключительных случаях, таких как добуривание низов скважины для обустройства пунктов термометрического мониторинга. Бурение аргиллитов, встреченных скважиной государственной сети мониторинга многолетней мерзлоты на метеостанции Санникова (о. Котельный, архипелаг Новосибирские острова) в диапазоне глубин 20,5 — 25,0 м, заняло 4 суток. В районе рудника Баренцбург на Шпицбергене, где в большинстве скважин верхняя часть разреза представлена грубообломочным материалом с преобладанием гравия, дресвы и гальки аргиллита с суглинистым и супесчаным заполнителем или без него [11], бурение «всухую» показало высокие скорости проходки, а колонковые снаряды высокую сопротив-

ляемость износу. В осадочных породах особую сложность может иметь проходка кремнистых и сидеритизированных прослоев и стяжений. На метеостанции Визе (о. Визе, север Карского моря) при организации термометрической скважины государственной сети мониторинга многолетней мерзлоты в меловых песках была встречена крупная кремнистая конкреция. Проходка 0,7 м по конкреции потребовала 6 часов, были потеряны резцы на двух колонковых снарядах, после чего бурение было перенесено в новую точку.

Нередко мерзлотные скважины вскрывают льдопроявления в виде погребенных льдов, повторно-жильных льдов, ледяных ядер бугров пучения. С теорией бурения льда можно подробно ознакомиться в специальной литературе, например [7]. Снаряды для бурения льда редко применяются в практике мерзлотных исследований. Во-первых, льды в разрезах мерзлотных скважин играют не главную роль. Во-вторых, дополнительная транспортировка ледовых буров осложняет логистику. В-третьих, грунтовые льды в отличие от ледников зачастую имеют минеральные прослои или примеси, которые быстро выводят из строя ледовые резцы, поэтому бурение грунтового льда проводится теми же снарядами, что и мерзлых пород. Лед в меньшей степени по сравнению с мерзлой породой подвергается плавлению, снаряд быстро запрессовывается. Проходка за рейс редко превышает 25–30 см. Тем не менее малогабаритные установки с использованием вышеописанных колонковых снарядов справлялись с задачей бурения как ядер булгунняхов, сложенных ледогрунтом с отдельными прослоями чистого льда в окрестностях Салехарда [13], так и массивных ледяных ядер гидролакколитов мощностью в 16 — 21 м на Шпицбергене [14, 15]. В скважине государственного мониторинга многолетней мерзлоты на о. Котельный повторно-жильный лед мощностью 16 м был пройден за 16 часов. Для бурения массивных скоплений грунтового льда с минеральными примесями и бурения ледогрунта требуется разработка специальных снарядов для бурения «всухую», которые позволили бы как повысить скорость проходки, так и качество ледяных кернов. Когда предстоит начинать бурение с поверхности льда водоема, наледи или мерзлого торфяника, то наилучшим вариантом будет его начать специальными бурами для льда, таким как, например, колонковый бур Kovacs (Kovacs Enterprises, Inc., США). Этот бур с успехом может применяться также для бурения грунтовых льдов большой мощности, лишенных минеральных примесей.

В случае если научная задача не требует получения кернов, вся скважина или отдельные диапазоны ее глубин могут с успехом проходиться шнеком. Шнеки с однолопастным долотом позволяют осуществлять проходку мерзлых суглинков, песков и гравия. Поскольку порода перестает выноситься на поверхность шнеками при глубине скважины более 10 м,

следует использовать штанги с навинченными снизу 4-метровыми шнеками и осуществлять «забурки» по 0,4 – 0,7 м, доставая и очищая скапливающийся на шнеках шлам.

### *Колонковое бурение с промывкой и продувкой*

Научное бурение мерзлых пород с промывкой малогабаритными установками может иметь ограниченное применение, например, для организации термометрических скважин в скальных и полускальных грунтах. Особенности данного метода применительно к малогабаритным установкам является невозможность выхода на оптимальный режим бурения из-за недостаточной нагрузки на забой, а для случая алмазных коронок и скорости вращения. Вторая особенность, вытекающая из применения метода в условиях мерзлоты, — замерзание промывочной жидкости. Низкая скорость проходки при научном бурении не является определяющим критерием. Что касается замерзания промывочной жидкости, то есть два пути решения данного вопроса: использование незамерзающих жидкостей (например, рассола) или подогрев жидкости на поверхности. Оба варианта значительно увеличивают вес комплекта бурового оборудования, усложняя транспортную логистику, поэтому рациональным вариантом является отказ от бурения в зимнее время, расположение точки бурения в непосредственной близости от источника воды, отказ от бурения ниже отметки, начиная с которой начинается льдообразование на стенках скважины. В летнее время температура воды в естественных водоемах, которые могут использоваться как источник промывочной жидкости, позволяет ей достаточно долго не замерзать при циркуляции внутри скважины. Из опыта бурения скважин при температурах скального грунта около  $-3^{\circ}\text{C}$  показано, что как минимум на глубине в несколько десятков метров льдообразования в циркулирующей жидкости не происходит. Метод бурения с промывкой водой был применен при обустройстве термометрической скважины на антарктической станции Русской, расположенной на сложенном габброидами свободном от льда участке суши Земли Мэри Бэрд (рис. 1 г). Колонковое бурение проводилось малогабаритной буровой установкой «Термит». Для промывки использовалась озерная вода с околонулевой температурой, нагнетаемая в скважину насосом НБ-1. Температура воздуха в течение работ составляла первые градусы ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Бурение алмазными коронками диаметром 76 мм велось трое суток, при остановках на ночь вода вычерпывалась из скважины желонкой. По достижении отметки в 13 м бурение было остановлено, так как в промывочной жидкости начала появляться шуга, а при подъеме колонковой трубы вверх со стенок скважины коронкой срезалась корка льда. Последующие замеры в скважине на этой глубине показали температуру  $-10,5^{\circ}\text{C}$ .

Бурение с продувкой не имеет ограничений, связанных с обязательным наличием водоемов и температурой в скважине. Норвежский университет UNIS успешно использует для мерзлотных исследований на Шпицбергене и в Гренландии специально сконструированный в единичном экземпляре станок UNIS Permafrost Drill Rig (рис. 5) с гидравлическим приводом и двумя работающими в параллели компрессорами общей производительностью  $2,8 \text{ м}^3/\text{мин}$ . при давлении 7 бар. Применение компрессоров и необходимость обеспечения их электроэнергией влечет за собой увеличение веса бурового комплекта, который составляет более 1000 кг. Однако за счет продувки станок UNIS Permafrost Drill Rig обладает возможностью бурения практически в любых грунтах, в том числе в грубообломочных с заполнителем изо льда. Такие грунты широко распространены в горных районах Шпицбергена и в Гренландии, где используется станок. Для проходки скальных и грубообломочных грунтов применяются алмазные коронки, а для проходки мерзлых песков и глин — коронки с твердосплавными резцами. Максимальная глубина бурения с отбором кернов диаметром 43 мм составила 20 м, максимальная глубина безкернового бурения сплошным забоем — 105 м. Несмотря на то, что теплоемкость воздуха ниже теплоемкости воды, в летнее время использование продувки также может приводить к растеплению керна и ствола скважины.



Рис. 5. Бурение установкой UNIS Permafrost Drill Rig на Шпицбергене. Справа виден керновый стол, оснащенный гидравлическим устройством для выдавливания керна из колонковой трубы

### *Заключение*

Для изучения разрезов, сложенных разностями мерзлых песков и суглинков с незначительным количеством скальных обломков, рекомендуется применять бурение «всухую». Установки для данного типа бурения могут быть наиболее легкими и простыми. Только они могут классифицироваться как переносные, т. е. могут перемещаться отрядом из 2-3 человек на 1-2 км в течение дня. Применять эти легкие буровые следует только в том случае, если есть априорная информация, что в заданном районе на глубину бурения не встретятся массивы скальных грунтов. В целях снижения количества шлама используются тонкостенные колонковые трубы с напаянными твердосплавными резцами. Рекомендуется применять алюминиевые штанги, колонну из которых можно поднимать вручную с глубины 25 м. Скорость бурения может снижаться при проходке льда и мерзлых торфов. Эти грунты с точки зрения скорости бурения и качества кернов рациональнее проходить специальными ледовыми пробоотборниками.

Проходку скальных грунтов в летнее время можно проводить методом колонкового бурения с промывкой в случае наличия рядом со скважиной источника воды. Данный метод может успешно применяться при бурении высокотемпературной мерзлоты, а в низкотемпературных разрезах имеет ограничения, связанные с образованием льда на стенках скважины при бурении глубже 10 м. По сравнению с бурением «всухую» вес комплекта возрастает из-за наличия насоса. Использование продувки позволяет вести бурение даже в таких сложных разрезах, как грубообломочные грунты с заполнителем изо льда. Вес компрессора сопоставим с весом станка, что существенно утяжеляет комплект бурового оборудования. Однако в отличие от бурения «всухую» и бурения с промывкой данный метод позволяет планировать бурение в более широком спектре горно-геологических условий.

Колонковое бурение малогабаритными установками вне зависимости от того, проводится оно «всухую», с продувкой или промывкой рационально осуществлять до глубин не более 25-30 м. Задачи бурения на большие глубины должны решаться с применением тяжелых установок, оснащенных мачтами для работы с бурильными штангами длиной 2 м и более, что изменяет подход к экспедиционной логистике.

Данный обзор не претендует на исчерпывающее рассмотрение вопроса. Вполне возможно, что уже существуют или в ближайшее время будут разработаны новые подходы и технические средства бурения мерзлых пород. Требуется продолжение систематизации и обмена опытом бурения мерзлоты.

**Список источников**

1. ГОСТ 25358–2020. Грунты. Метод полевого определения температуры.
2. ГОСТ Р 58325–2018. Грунты. Полевое описание.
3. ГОСТ 12071–2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов.
4. Рекомендации по бурению скважин в мерзлых грунтах при инженерно-геологических изысканиях для строительства / Произв. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в стр-ве Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1974. – 80 с.
5. Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Анисимов М.А., Угрюмов Ю.В. Концепция и первые результаты проекта создания государственной системы мониторинга многолетней мерзлоты РФ на базе наблюдательной сети Росгидромета // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск, 2023. – С. 384-387.
6. Kraev G., Shein A., Kamnev Y., Filimonov M., Vaganova N. Developing a regional permafrost monitoring system in Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia // Abstarcts: 2021 Regional Conference on Permafrost and 19th International Conference on Cold Regions Engineering, 2022 - P. 51-52.
7. Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and other Planets // Eds Bar-Cohen Y., Zacny K. Darmstadt. - John Wiley&Sons, 2009. – 767 p.
8. Абрамов А.А. и Демидов Н.Э. В поисках самой древней мерзлоты на Земле в Сухих долинах Антарктиды // Российские полярные исследования. – 2015. – № 1 (19). – С. 36-40.
9. Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Занина О.Г., Караевская Е.С., Пушина З.В., Ривкина Е.М., Шмелев Д.Г. Конечная морена и озерно-лагунные отложения в разрезе четвертичных отложений оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – Т. 97. – № 3. – С. 79-90.
10. Демидов Н.Э., Баранская А.В., Дурденко Е.В., Занина О.Г., Караевская Е.С., Пушина З.В., Ривкина Е.М., Спирина Е.В., Спенсер Р. Биогеохимия мерзлых толщ арктического побережья полуострова Гыдан // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. – № 3 (109). – С. 34-49.
11. Демидов Н.Э., Борисик А.Л., Веркулич С.Р., Веттерих С., Гунар А.Ю., Демидов В.Э., Желтенкова Н.В., Кошурников А.В., Михайлова В.М., Никулина А.Л., Новиков А.Л., Саватюгин Л.М., Сироткин А.Н., Терехов А.В., Угрюмов Ю.В., Ширрмейстер Л. Мерзлотно-гидрогеологические условия западной части Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19. – № 4. - С. 68–93. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.4-6>.

12. Обидин Н.И. Инструкция по изучению мерзлоты и подземных вод в Арктике / М.: Изд.-во Главсевморпути, 1947. – 110 с.
13. Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И., Гагарин В.Е., Гузева А.В., Дежникова А.А., Казанцев В.С., Кошурников А.В., Нарижная А.И. Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехарда, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. – 2022. – Т. 21. – № 3. – С. 27-38. - <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-4>.
14. Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Anisimov M., Demidov V., Meyer H., Schirrmeister L., Hodson A.J.. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grondalen, West Spitsbergen // Cryosphere. – 2019. – 13. - P. 3155-3169. -<https://doi.org/10.5194/tc-13-3155-2019>.
15. Demidov V., Demidov N., Verkulich S., Ekaykin A., Terekchov A., Veres A., Kozachek A., Wetterich S., Schirrmeister L., Koshurnikov A., Gagarin V. Pingo drilling reveals sodium-chloride-dominated massive ice in Grondalen, Spitsbergen // Permafrost and Periglacial Processes. - 2021. – P. 1–15. - <https://doi.org/10.1002/ppp.2124>.

---

### *Сведения об авторе*

---

**Демидов Никита Эдуардович** в 2011 г. получил степень кандидата геолого-минералогических наук. С 2023 г. является ведущим научным сотрудником ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард, Россия). Неоднократно организовывал и принимал участие в экспедициях в качестве бурового мастера. Область научных интересов: высокоширотные районы Арктики и Антарктики.

Статья поступила в редакцию 09.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 9, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 21-36.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 21-36.

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 551.34, 536.5, 519.688

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ДЛЯ ОСНОВАНИЙ ДВУХ ЗДАНИЙ В Г. САЛЕХАРДЕ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ

*Александр Николаевич Шеин<sup>1</sup>, Михаил Юрьевич  
Филимонов<sup>2</sup>, Наталия Анатольевна Ваганова<sup>3</sup>, Ярослав  
Константинович Леопольд<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>2, 3</sup>Институт математики и механики Уральского отделения РАН,  
г. Екатеринбург

<sup>2, 3</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

<sup>1</sup>A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

<sup>2</sup>fny@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>

<sup>3</sup>vna@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>

<sup>4</sup>KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

**Аннотация.** Проведены расчёты нестационарных тепловых полей в мёрзлых грунтах оснований фундаментов двух зданий в г. Салехарде. Моделирование проводилось с учетом особенностей конструкций свайных фундаментов, эксплуатируемых по принципу сохранения мерзлого состояния грунта. Показана необходимость учёта всего цикла работы сезонных охлаждающих устройств при расчётах для теплотехнических расчётов. Проведенные расчеты несущих способностей свай для зданий I и II показали, что для здания I наблюдается увеличение несущих способностей свай, для здания II ситуация в зоне свайного фундамента стабильная. Рекомендуется проводить

дальнейший мониторинг и анализ изменения динамики несущих способностей свай для зданий I и II.

**Ключевые слова:** свайный фундамент, мерзлота, температурный мониторинг, несущая способность.

**Цитирование:** Шеин А.Н., Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Леопольд Я.К. Теплотехнические расчёты для оснований двух зданий в г. Салехарде с учётом температурного мониторинга мёрзлых грунтов // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 21–36. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002.

Original article

## ТHERMAL ENGINEERING CALCULATIONS FOR THE FOUNDATIONS OF TWO BUILDINGS IN SALEKHARD, TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE MONITORING OF PERMAFROST

*Alexandr N. Shein*<sup>1</sup>, *Mikhail. Yu. Filimonov*<sup>2</sup>,  
*Nataliia. A. Vaganova*<sup>3</sup>, *Yaroslav K. Leopold*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Arctic Research Center, Salekhard, Russia

<sup>2,3</sup>Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ekaterinburg, Russia

<sup>2,3</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup>A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

<sup>2</sup>fmy@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>

<sup>3</sup>vna@imm.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>

<sup>4</sup>KamnevYK@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2993-0979>

**Abstract.** Calculations of non-stationary thermal fields in frozen soils of the foundations of two buildings in Salekhard were carried out. The modeling was carried out taking into account the features of pile foundation structures operated on the principle of preserving the frozen state of the soil. The necessity of taking into account the entire cycle of operation of seasonal cooling devices in calculations for thermal engineering calculations is shown. The calculations of the bearing capacity of piles for buildings I and II showed that for building I there is an increase in the bearing capacity of piles, for building II the situation in the pile foundation area is stable. It is recommended to carry out further monitoring and analysis of changes in the dynamics of the bearing capacity of piles for buildings I and II.

**Keywords:** piling foundations; permafrost; temperature monitoring; modeling; bearing capacity.

**Citacion:** A.N. Shein, M.Yu. Filimonov, N.A. Vaganova, Ya.K. Leopold Thermal engineering calculations for the foundations of two buildings in Salekhard, taking into account the temperature monitoring of permafrost // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 21–36. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002.

### *Введение*

Больше четверти верхнего слоя земной коры Северного полушария находится в мёрзлом состоянии. Многолетнемёрзлые грунты в России занимают 60–65% территории или 11 млн км<sup>2</sup> [1, 2]. Большинство жилых зданий и промышленных сооружений в зоне вечной мерзлоты возводятся по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Однако при строительстве объектов и дальнейшей эксплуатации используются устаревшие нормы и правила [3–5]. Кроме того, эксплуатационные нормы носят рекомендательный характер и зачастую не выполняются эксплуатирующими организациями. С учётом того, что российская Арктика развивается быстрыми темпами и играет для страны стратегическое значение, необходима актуализация правил строительства и эксплуатации капитальных объектов на северных территориях, разработка новых автоматизированных систем геотехнического мониторинга. В первую очередь это касается температуры – важнейшего параметра, характеризующего состояние мерзлоты. Контроль за ней необходим для подтверждения требуемой несущей способности грунтов основания и предотвращения опасных для устойчивости сооружений мерзлотных геокриологических процессов.

### *Материалы и методы*

Для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов в ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга [6–8]: термометрическое оборудование, портал сбора и визуализации данных и программа для расчёта нестационарных тепловых полей. Под объектами капитального строительства в г. Салехарде уже пробурено и оборудовано термометрическими косами больше 150 скважин. Скважины пробурены до глубины 12 м с отбором образцов пород для анализов и геологическим описанием, что позволило с некоторым приближением восстановить теплофизические характеристики грунта и построить трёхмерные физико-геологические модели оснований исследуемых объектов, которые необходимы для даль-

нейших расчётов температурных полей. Скважины оснащены термометрическим оборудованием (шаг термодатчиков 0,5 м до глубины 5 м, далее 1 м). Погрешность калибровки датчиков измерения температуры:  $\pm 0.1$  °С. Разрешающая способность измерения температуры: 0.07 °С.

Настроенное оборудование каждые 3 часа регистрирует и каждые 12 часов передаёт температуру грунтов основания здания в единую базу на удалённый сервер при помощи GSM и NB-IoT. Данные дублируются на специально разработанный портал <https://monitoring.arctic.yanao.ru> [9] для сбора и визуализации данных. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где на базе отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных. Такие уникальные данные можно использовать для численного моделирования и прогнозирования температуры грунта во всей области расположения свайного фундамента.

Для моделирования тепловых полей в мерзлых грунтах в основании свайных фундаментов зданий в северных городах, следует учитывать различные климатические и физические факторы. В первую очередь – это сезонное изменение температуры воздуха, приводящее к периодическому протаиванию (промерзанию) грунта, снежный покров, учет солнечного излучения в случае необходимости и т.п. Также следует учитывать геометрические места расположения свай, их размеры, наличие сезоннодействующих охлаждающих устройств (COU), возможные источники тепла, коммунальные аварии.

На основе известных алгоритмов и моделей [10-12] реализована программа для расчета нестационарных тепловых полей под зданиями со свайными фундаментами в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов [7, 8, 13, 14]. Численный алгоритм, реализованный в программе, учитывает данные мониторинга температуры грунта, технические особенности конкретного свайного фундамента и позволяет спрогнозировать изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата. Данные, получаемые при температурном мониторинге, были использованы для верификации разработанной программы [14] и дальнейших теплотехнических расчётов для оснований двух зданий в г. Салехарде.

Под жилым зданием I для методических работ было пробурено и оборудовано 24 скважины по плотной равномерной сети, под зданием II – 16 (рис. 1, 2).

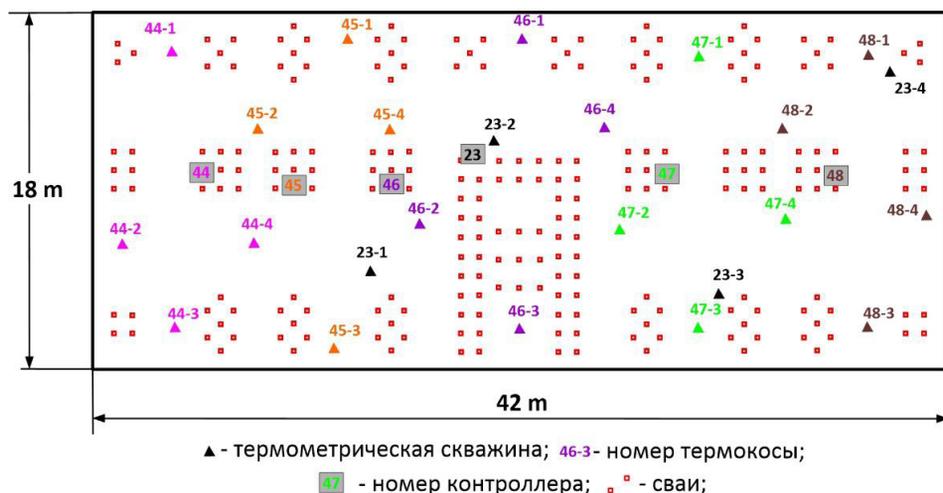


Рис. 1. Расположение свай и термометрических скважин для здания I

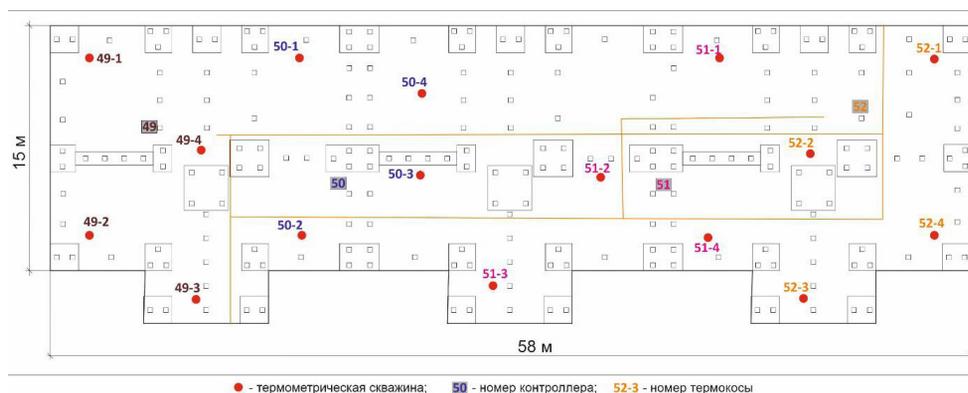


Рис. 2. Расположение свай и термометрических скважин для здания II

Численный алгоритм, реализованный в программе [7, 8, 13, 14], позволяет учитывать данные мониторинга температуры грунта в скважинах, литологические и технические особенности конкретного свайного фундамента. В плоскости  $\{x,y\}$  или вид сверху схема расположения свайного фундамента и термометрических скважин представлена на рис. 1 и 2 для зданий I и II соответственно.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Плотная сеть термометрических скважин позволила провести тестирование и верификацию программы. Кроме того, установлено [8], что

при проведении расчетов температурных полей необходимо использовать среднесуточную температуру воздуха на основании данных температурного мониторинга и учитывать всю историю эксплуатации свайного фундамента, в первую очередь работу СОУ. При перечисленных условиях результаты численных расчетов с хорошей точностью совпадают с экспериментальными данными (рис. 3).

Сравнение температурных данных с расчетными показали, что автоматизированный температурный мониторинг (АТМ) является необходимым звеном для проведения теплофизических расчетов и позволяет адаптировать предложенный алгоритм для расчета изменения динамики температурного режима в области свайного фундамента для конкретного жилого здания. Так здание II имеет принципиально другие конструкции СОУ. В 2021 г. наблюдался ряд коммунальных аварий, которые повлияли на температурный режим основания, что потребовало внесения особенностей в алгоритм проведения расчетов. В частности, предложено учитывать дополнительно данные температурных датчиков на поверхности грунта для адекватного учета температурного режима проветриваемого подполья и задавать эффективность работы СОУ в соответствии с данными АТМ.

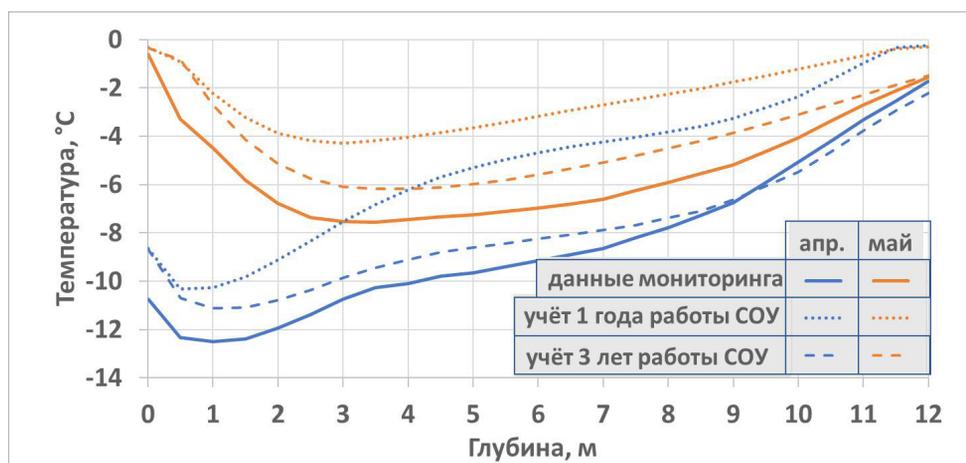


Рис. 3. Профили температуры в скважине здания I в апреле-мае 2021 года. Экспериментальные данные (сплошные линии); численный расчет с учётом 1 года (точечные линии) и 3 лет (пунктирные линии) эксплуатации СОУ

Расчёты температурных полей показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, что позволяет нам перейти к оценке несущей способности свайного фундамента. Расчет надежности свайного фундамента проводится на основании действующего в настоящее время свода правил [3], который разработан в целях соблюдения требований Феде-

рального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Настоящий свод правил распространяется на проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения многолетнемерзлых грунтов.

Определим изменение несущей способности свайного фундамента под зданием I в 2023 году в зависимости от изменения температуры воздуха в проветриваемом подполье (ПП) при различных сценариях изменения температуры воздуха  $T_{air}$  в ПП, который фиксирует датчик температуры воздуха на контроллере № 44 (рис. 1). На рис. 4 приведены эти показания (рис. 4, синяя кривая) в сравнении с изменениями температуры поверхности грунта, который фиксирует первый датчик в скважине 44-4 (рис. 4, оранжевая кривая) с 27.11.2020 г. по 18.11.2022 г.

Найдем средние значения температур воздуха в ПП возле контроллера № 44  $T_{air}[t_1, t_2]$  и поверхности грунта в скважине  $T_{44-4}[t_1, t_2]$  здания I для двух годовых циклов с 04.12.2020 г. по 18.11.2021 г. и с 04.12.2021 г. по 18.11.2022 г.:

$T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -3,459004;$	$T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,542539$
$T_{44-4}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,367759;$	$T_{44-4}[04.12.2021, 18.11.2022] = -1,789868$

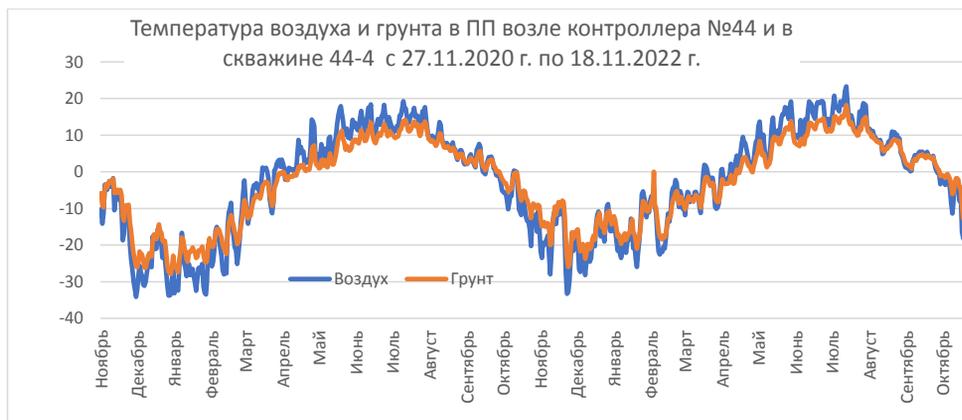


Рис. 4. Температура воздуха (синий цвет) в ПП и поверхности грунта в скважине 44-4 здания I

Средние температуры воздуха в ПП практически одинаковы, однако в 2021 году в холодное время года температура в ПП была в среднем ниже (рис. 5, синяя кривая), чем в 2022 году (рис. 5, оранжевая кривая). Действительно,

$T_{air}[17.01.2021, 01.04.2021] = -22,672642;$	$T_{air}[17.01.2022, 01.04.2022] = -13,681283.$
---	---

Таким образом, средняя температура воздуха в ПП вблизи контроллера № 44 в указанный период времени в 2021 году была ниже средней температуры в этот же промежуток времени в 2022 году почти на 9 °С. Такие климатические колебания могли сказаться на эффективности работы СОУ.

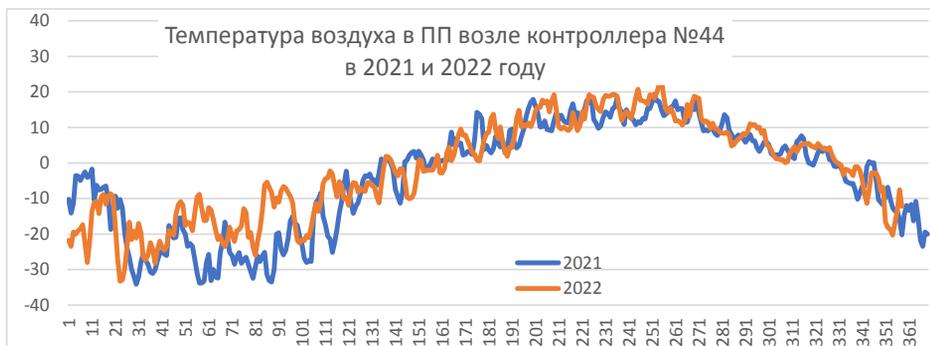


Рис. 5. Температура воздуха в ПП здания I в 2021 г. (синяя линия) и в 2022 г. (оранжевая линия)

Используя данные температурного мониторинга, было рассчитано температурное поле в основании фундамента, в том числе температуры на поверхности каждой сваи, и затем пересчитаны в несущую способность. Для удобства вводятся понятия минимальная несущая способность (берется максимальная температура на 4 поверхностях свай) и максимальная несущая способность (берется минимальная температура на 4 поверхностях свай). Для оценки несущих способностей свай можно пользоваться только минимальной несущей способностью свай. Более детальные расчеты несущей способности свай возможны в случае, когда минимальная несущая способность свай становятся близкой к критическим проектным значениям. На рис. 6 приводятся расчетные значения несущих способностей каждой из свай с ноября 2021 г. по октябрь 2022 года для здания I.

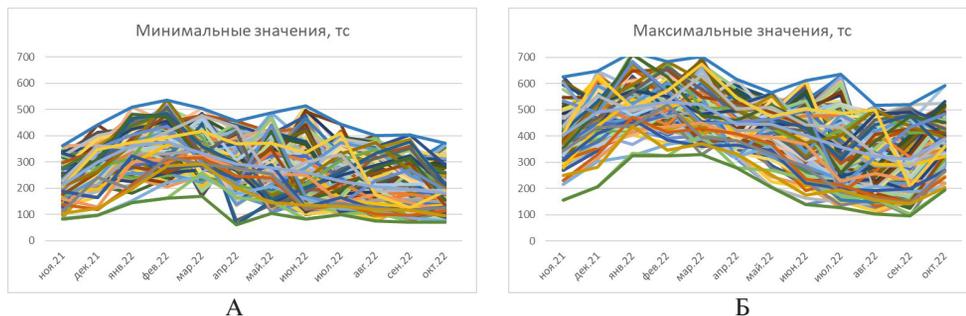


Рис. 6. Максимальное (А) и минимальное (Б) значения несущей способности свай здания I

На рис. 7 показана динамика изменения несущей способности свай в 2023 году при различных сценариях изменения температуры воздуха в ПП здания I с использованием данных 2021-го и 2022 годов.

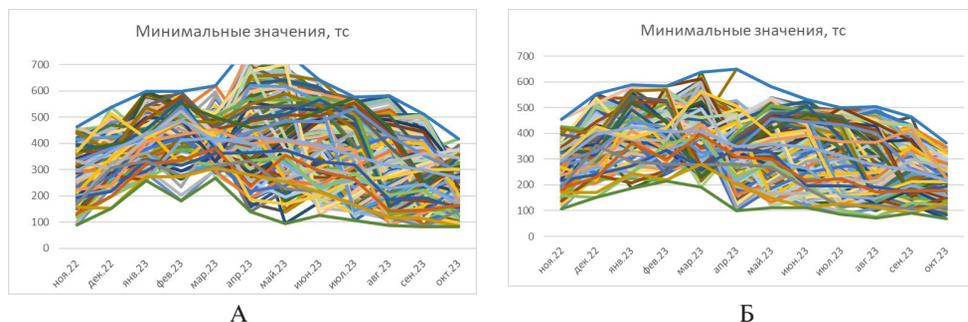


Рис. 7. Прогноз несущих способностей свай здания I в 2023 году по сценарию 2021 года (А) и 2022 года (Б)

В случае варианта 7А минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 237 свае и равняется  $F_{u,237,10} = 82,19524$  Тс. В случае варианта 7Б минимальное значение несущей способности достигается в ноябре 2023 года на 115 свае и равняется  $F_{u,115,11} = 69,58693$  Тс. При этом минимальное среднее значение несущей способности всех свай при этом варианте достигается в ноябре и равняется  $F_{u,11} = 218,0867$  Тс. В случае варианта 7А минимальное среднее значение несущей способности всех свай достигается также в ноябре и равняется  $F_{u,11} = 269,3661$  Тс.

Таким образом показано, что климатический фактор оказывает существенное влияние на несущую способность свай. При этом холодный зимний период (даже при примерном равенстве средних годовых температур воздуха в ПП при рассматриваемых сценариях задания климатических данных) становится решающим для значительного различия минимальных (до 18%) и средних значений несущих способностей по всем сваям здания I (до 24%). Такое различие может быть объяснено за счет эффективной работы СОУ.

На значения несущих способностей свай для здания II окажут влияние коммунальные аварии зимой 2021 года, которые привели к образованию наледи, поэтому тепловой режим в ПП будет зависеть от объема льда и от скорости его таяния, которое продолжалось практически до конца июля 2021 года. На рис. 8 представлены изменения температур воздуха и поверхности грунта вблизи контроллера № 52 и в скважине 52-4 соответственно.

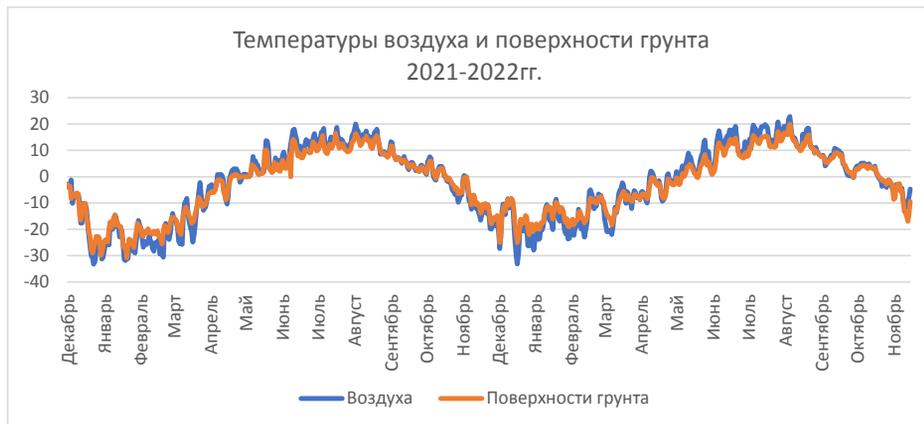


Рис. 8. Температура воздуха в ПП и температура поверхности грунта в 2021-2022 гг.

Найдем средние значения температур воздуха в ПП  $T_{air}[t_1, t_2]$  и поверхности грунта  $T_{52-4}[t_1, t_2]$  здания II на промежутках времени с 04.12.2020 по 18.11.2021 и с 04.12.2021 по 18.11.2022.

$T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,17155;$	$T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,1391;$
$T_{52-4}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,51042$	$T_{52-4}[04.12.2021, 18.11.2022] = -3,15899$

Таким образом,  $T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021]$  существенно выше, чем  $T_{air}[04.12.2021, 18.11.2022]$ . Заметим, что в холодное время года температура в ПП зимой 2021 года была в среднем ниже, чем в 2022 году, что могло сказаться на эффективности работы СОУ в случае, если они находятся в рабочем состоянии. Действительно, имеем

$T_{air}[17.01.2021, 01.04.2021] = -22,0161$	$T_{air}[17.01.2022, 01.04.2022] = -13,5434.$
--	---

Оказывается, что эти значения в холодное время практически совпадают с аналогичными данными здания I за исключением средней температуры  $T_{air}[04.12.2020, 18.11.2021] = -1,17155$ .

На рис. 9 представлены изменения температур воздуха в ПП и температура поверхности грунта в скважине 50-4, находящейся в центре образования ледяного слоя. Хорошо видно нулевое значение температуры на первом датчике в скважине 50-4 (рис. 9, оранжевая кривая). Начало околонулевых значений сигнализирует об образовании наледи, а переход в положительную зону — исчезновение.

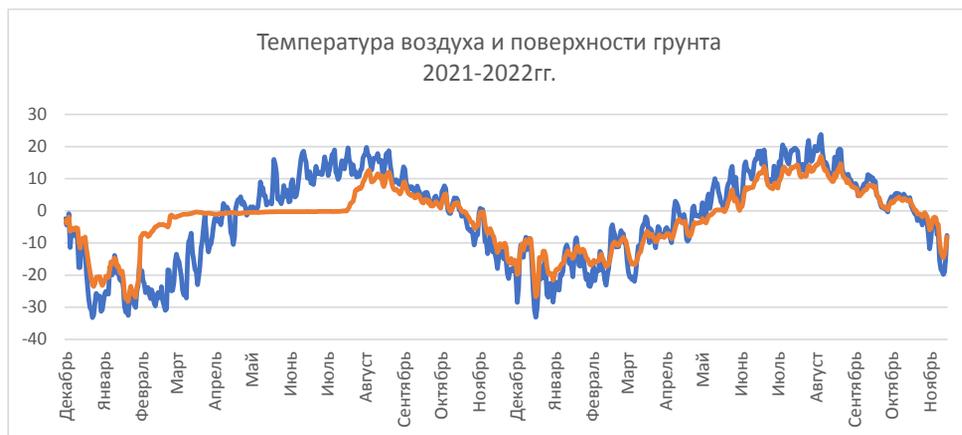


Рис. 9. Температура воздуха в ПП и температура поверхности грунта в скважине 50-4 в здании II

На рис. 10 приведено изменение несущих способностей свай в 2021-м и 2022 годах. Длина столбиков дублирует цвет и обозначает величину несущей способности каждой сваи: чем выше столбик, тем больше несущая способность.

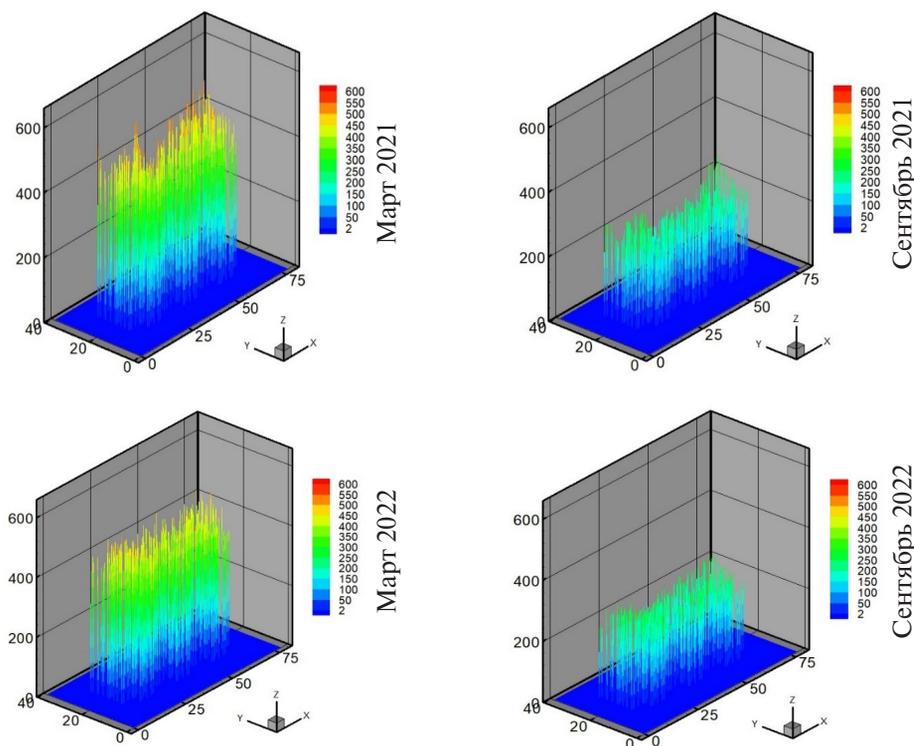


Рис. 10. Изменение несущих способностей свай [Тс] здания II

Сделаем прогноз несущих способностей свай на 2023 год в зависимости от двух климатических сценариев: 2021-го и 2022 годов. На рис. 11 приведены прогнозы несущих способностей свай на 2023 год. В случае варианта 11Б (сценарий 2022 года) минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 88 свае и равняется  $F_{u,88,10} = 150,063$  Тс. В случае варианта 11А (сценарий 2021 года) минимальное значение несущей способности достигается в октябре 2023 года на 211 свае и равняется  $F_{u,211,10} = 140,682$  Тс. При этом минимальное среднее значение несущей способности всех свай при этом варианте достигается в ноябре и равняется  $F_{u,11} = 228,8494$  Тс. В случае варианта 11Б минимальное среднее значение несущей способности всех свай достигается в октябре и равняется  $F_{u,10} = 215,525$  Тс.

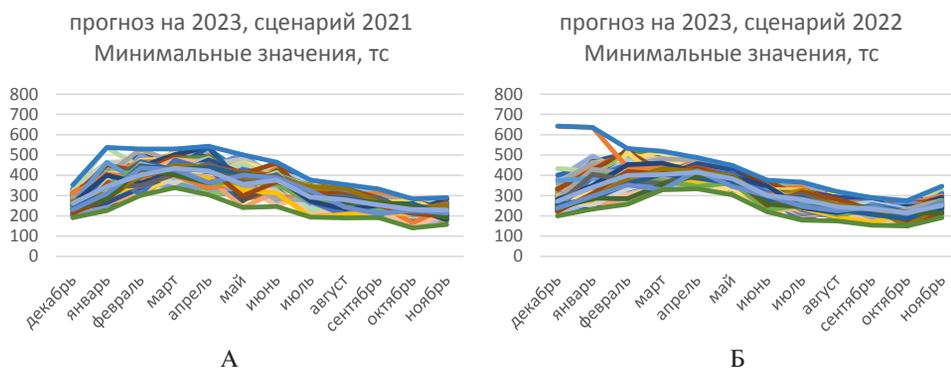


Рис. 11. Несущая способность свай здания II в 2023 году по сценарию 2021 года (А) и 2022 года (Б)

Таким образом, анализ изменения несущих способностей свай в 2023 году при различных климатических данных, соответствующих данным температурного мониторинга 2021-го и 2022 годов, показал незначительное отличие (до 5%) в октябре-ноябре 2023 года минимальных несущих способностей свай и средних значений несущей способности по всем сваям.

### Заключение

Протестирована с использованием экспериментальных данных программа для расчёта распространения нестационарных тепловых полей в мёрзлых грунтах с учетом особенностей конструкций свайных фундаментов северных городов, эксплуатируемых по принципу сохранения мерзлого состояния грунта.

Установлено, что при проведении расчетов температурных полей необходимо использовать среднесуточную температуру воздуха на основа-

нии данных температурного мониторинга и учитывать всю историю эксплуатации свайного фундамента, в первую очередь работу СОУ.

Показано, что АТМ является необходимым звеном для проведения теплофизических расчетов и позволяет адаптировать предложенный алгоритм для расчета изменения динамики температурного режима в области свайного фундамента для конкретного жилого здания.

Проведенные расчеты несущих способностей свай для зданий I и II показали, что для здания I наблюдается увеличение несущих способностей свай, для здания II ситуация в зоне свайного фундамента стабильная, последствия коммунальных аварий зимой 2021 года в 2022 году практически не ощущаются. Рекомендуется проводить дальнейший мониторинг и анализ изменения динамики несущих способностей свай для зданий I и II.

Разработанное программное обеспечение позволяет оценить изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата, что позволит предупредить возможные аварийные ситуации.

### *Благодарность*

Авторы благодарят Куракова С.А. за разработку, совершенствование и обслуживание термометрического оборудования.

Работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства».

### *Список источников*

1. Brown J., Ferrians Jr, O.J., Heginbottom J.A. and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions (p. 45). Reston, VA: US Geological Survey.
2. Brown J., Ferrians, Heginbottom J.A. and Melnikov E. (2002). Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. [online]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, DOI: 10.7265/skbg-kf16. (Accessed 20 Apr. 2023).
3. СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04-88 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 915/пр) (ред. от 31.05.2022).
4. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170 (с изм. от 22.06.2022) «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» (зарегистрировано в Минюсте РФ 15.10.2003 № 5176) [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: <http://www.consultant.ru>.

- ru/ URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_44772/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/) (дата обращения: 03.11.2023).
5. Шейн А.Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А.Н. Шейн, Я.К. Камнев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3 (108). – С. 42–50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007
  6. Громадский А.Н. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехарда / А.Н. Громадский, С.В. Арефьев, Н.Г. Волков, Я.К. Камнев, А.И. Синицкий // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – № 3. – С. 17–21. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
  7. Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard (Preliminary Results). GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 0; <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021>
  8. Filimonov, M.Y.; Kamnev, Y.K.; Shein, A.N.; Vaganova, N.A. Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring // Land 2022, 11(7), 1102. <https://doi.org/10.3390/land11071102>
  9. System of automated geocryological monitoring (2021) [online] Available at: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 20 Apr. 2021 in Russian)
  10. Samarsky, A.A.; Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer, Volume 2, The Finite Difference Methodology; New York: Chichester, Wiley, 1995
  11. Vaganova, N.A.; Filimonov, M.Yu. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 2019, 11386, 580–587. DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5\_68
  12. Vaganova, N.; Filimonov, M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions. IOP Conf. Ser.: Earth Environ 2017, 72, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012005
  13. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю., Камнев Я.К., Шейн А.Н. Расчет нестационарных температурных полей в зоне свайного фундамента зданий с учетом температурного мониторинга // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. – Салехард: 2021. – 75–77 с.
  14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660946. – М.: Роспатент, 10.06.2022. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022660946&TypeFile=html](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2022660946&TypeFile=html) (дата обращения: 15.03.2023).

---

**Сведения об авторах**

---

**Шеин Александр Николаевич**, 1981 г.р., окончил механико-математический факультет НГУ, в 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), ведущий научный сотрудник сектора криосферы, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации.

**Филимонов Михаил Юрьевич**, 1958 г.р., окончил математико-механический факультет УрГУ, в 1987 г. защитил кандидатскую, в 2007-м защитил докторскую диссертацию. ИММ УрО РАН, ведущий научный сотрудник отдела прикладных задач, заведующий кафедрой высокопроизводительных компьютерных технологий ИЕНиМ УрФУ (Екатеринбург, Россия), д.ф.-м.н. Сфера научных интересов: моделирование технических и природных систем, обустройство нефтегазовых месторождений, численные и аналитические методы, криолитозона, свайные фундаменты, геотермальная энергия.

**Ваганова Наталия Анатольевна**, 1973 г.р., окончила математико-механический факультет УрГУ, в 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию. ИММ УрО РАН, старший научный сотрудник отдела прикладных задач (Екатеринбург, Россия), к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: компьютерное моделирование, обустройство нефтегазовых месторождений, вычислительные высокопроизводительные и информационные технологии, криолитозона, свайный фундамент, несущая способность грунта, геотермальная энергия.

**Леопольд Ярослав Константинович**, 1987 г.р., окончил физический факультет НГУ, в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию, к.ф.-м.н. Сфера научных интересов: криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, Big Data. E-mail: KamnevYK@gmail.com.

---

**Участие авторов**

---

Шеин А.Н. – сбор, подготовка и интерпретация экспериментальных данных, написание и редактирование текста;

Филимонов М.Ю. – концепция исследования, проведение расчётов, анализ результатов, написание и редактирование текста;

Ваганова Н.А. – концепция исследования, проведение расчётов, анализ результатов, написание и редактирование текста;

Леопольд Я.К. – концепция исследования, редактирование текста.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 13, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 37-54.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 37-54.

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 556.3; 551.34

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.003

### ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕРРИТОРИИ Г. САЛЕХАРДА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2023 Г.

*Валентина Анатольевна Паламарчук<sup>1</sup>, Анна Александровна Башкова<sup>2</sup>*

<sup>1, 2</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Москва, Россия

<sup>1</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>1</sup>*vpalamarchuk@yanao.ru*

<sup>2</sup>*aabashkova@yanao.ru*

**Аннотация.** В статье представлены результаты проведения гидрологических исследований в летний период 2023 г. для целей организации гидрогеологического мониторинга на территории г. Салехарда. Охарактеризованы температура, удельная электропроводность и водородный показатель вод р. Васьёгана, Преображенки и руч. Наледного. Выделены особенности макро- и микрокомпонентного составов поверхностных и подземных вод. Проведение гидрометрических работ позволило выявить особенности летнего режима поверхностных водотоков, а также установить участие подземных вод в формировании их стока.

**Ключевые слова:** гидрогеологический мониторинг, поверхностные и подземные воды криолитозоны, гидрометрические работы, геохимическое опробование.

**Цитирование:** Паламарчук В.А., Башкова А.А. Первые результа-

ты организации гидрогеологического мониторинга на территории г. Салехарда в летний период 2023 г. // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 37–54. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.003.

Original article

## THE FIRST RESULTS OF THE ORGANIZATION OF HYDROGEOLOGICAL MONITORING ON THE TERRITORY OF SALEKHARD IN THE SUMMER OF 2023

*Valentina A. Palamarchuk<sup>1</sup>, Anna A. Bashkova<sup>2</sup>*

<sup>1,2</sup>*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

<sup>1</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*ECI Tyumen Scientific Centre SB RAS., Tyumen*

<sup>1</sup>*vapalamarchuk@yanao.ru*

<sup>2</sup>*aabashkova@yanao.ru*

**Abstract.** The article presents the results of hydrological research in the summer of 2023 for organizing hydrogeological monitoring on the territory of Salekhard. The temperature, electrical conductivity and hydrogen index of the waters of the Vasyegan, Preobrazhenka and Naledny streams are characterized. The features of the macro- and micro-component composition of surface and underground waters are highlighted. The hydrometric work allowed to identify the features of the summer regime of surface watercourses, as well as to establish the participation of groundwater in the formation of their flow.

**Keywords:** hydrogeological monitoring, surface and underground waters of the cryolithozone, hydrometric works, geochemical sampling.

**Citation:** V.A. Palamarchuk, A. A. Bashkova Results of hydrogeological monitoring on the territory of Salekhard in the summer period of 2023 // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 37–54. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.003.

### *Введение*

Проведение гидрогеологических исследований входит в перечень видов инженерных изысканий, которые выполняют для целей строительства [1]. Наличие грунтовых вод, а также их режим влияют на принятие проектных решений по обеспечению устойчивости объектов инфраструктуры. Неучет гидрогеологических условий может спровоцировать ряд проблем, связанных с подземными водами, таких как подтопление зданий и сооружений из-за увеличения количества осадков или из-за преграждения подземным сооружением части водоносного горизонта («барражный эффект»); размывание грунтов основания; растепление грунтов основания, представленных многолетнемерзлыми породами; коррозионное воздействие подземных вод на фундаменты. Организация и ведение постоянного мониторинга за подземными водами позволит предотвратить развитие данных процессов. Также изучение режима и баланса подземных вод позволит количественно охарактеризовать процесс их формирования и дать прогноз изменений гидрогеологических условий в естественных и антропогенных ландшафтах.

С 1976-го по 1990 г. в Салехарде велись стационарные режимные наблюдения на Салехардской комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической станции. Целью наблюдений был оперативный и долгосрочный прогноз основных климатических, гидрологических, гидрогеологических и геокриологических параметров путем обобщения и анализа многолетних наблюдений [2]. Основным объектом исследований являлись подземные воды четвертичных отложений в естественных и нарушенных условиях режима. По этому виду наблюдений был накоплен значительный фактический материал. Однако ввиду того, что не все скважины наблюдательной сети имели одинаковую продолжительность наблюдений, а также из-за отсутствия надежной измерительной аппаратуры, которой можно было проводить измерения в условиях развития многолетнемерзлых пород, режим подземных вод был охарактеризован недостаточно полно.

С 2023 г. сотрудники Научного центра изучения Арктики приступили к возобновлению гидрогеологических исследований на территории г. Салехарда. Возобновление данных работ позволит оценить динамику изменений состояния подземных вод в условиях меняющегося климата и, соответственно, на фоне деградации многолетнемерзлых пород. В антропогенных ландшафтах наблюдения за уровнем, температурой и химическим составом подземных вод позволят предотвратить возможность подтопления зданий и сооружений при повышении уровня грунтовых вод и разработать комплекс мероприятий, направленных на регулирование подземного и поверхностного стока в условиях городской застройки.

Основной целью нашего исследования является восстановление и расширение мониторинговой сети, включающей в себя гидрогеологические и геотермические скважины, гидрометрические посты и закрепленные на местности пункты геохимического опробования.

В данной работе представлены результаты проведения гидрологических работ в составе гидрогеологической съемки на территории г. Салехарда в летний период 2023 г.

### *Материалы и методы*

В состав маршрутных наблюдений при проведении гидрогеологических исследований входит проведение гидрологических работ. Задачи гидрологических работ: 1) изучение взаимосвязи подземных и поверхностных вод; 2) измерение расходов поверхностных вод, 3) выяснение физических свойств и химического состава поверхностных вод. Эти данные используются для ориентировочной оценки естественных ресурсов подземных вод и характеристики условий их питания и разгрузки [3]. Гидрологические наблюдения проводят на реках и ручьях, где часто проявляется естественное дренирование водоносных горизонтов. По результатам рекогносцировочных работ нами были выбраны 3 водотока: р. Преображенка, р. Васьёган и руч. Наледный (рис. 1).

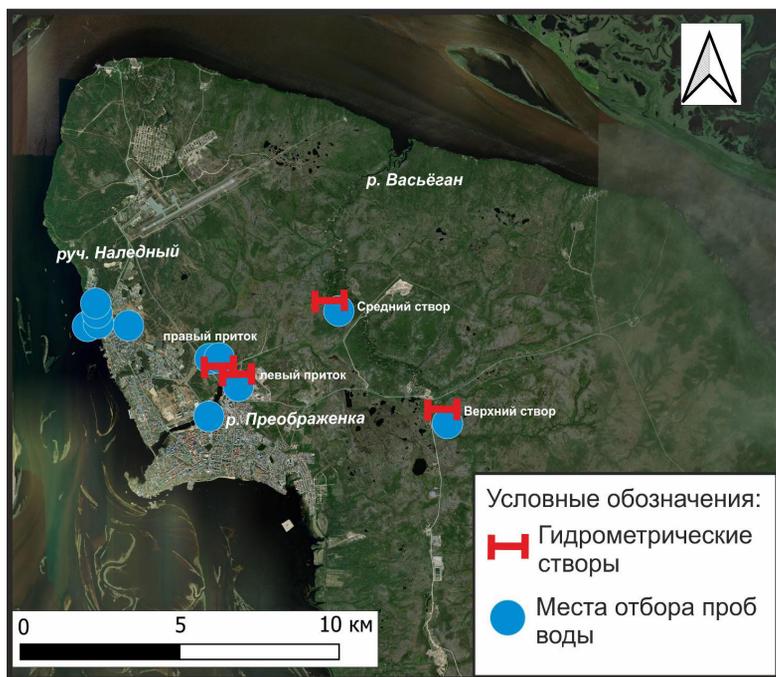


Рис. 1. Территория исследований

В ходе полевых работ были выполнены измерения температуры ( $t$ , °C), удельной электропроводности (ЕС, мкСм/см) и водородного показателя (рН) поверхностных вод с использованием мультимонитора НМ Digital Hydromaster НМ-200.

Отобрано 20 водных проб для характеристики их макрокомпонентного состава и 27 водных проб для изучения микрокомпонентного состава. При статистической обработке результатов химических анализов поверхностных вод также привлечены фондовые материалы [2, 4]. Аналитические исследования состава воды выполнены в химико-аналитической лаборатории ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Надым) методами фотометрии, гравиметрии и титриметрии, а также в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами анализа с индуктивно связанной плазмой. Пробы воды были отобраны в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 [5].

С июня по октябрь проводились регулярные замеры расходов воды на четырех гидрометрических створах методом площадь-скорость. Измерения скоростей течения производились гидрометрической вертушкой ИСВП-ГР-21М с ИСО-1, вычисления велись аналитическим способом. Для анализа полученных результатов также были привлечены фондовые данные [2, 4].

### *Объект исследований*

Салехард расположен в северо-западной части Западно-Сибирской низменности. Исследуемая площадь представляет собой сравнительно высоко приподнятую над уровнем моря равнину Обско-Полуйского водораздела. Наиболее высокие абсолютные отметки водораздела колеблются от 60 до 93 м (Ангальский мыс), минимальные отметки составляют 2,0 м (отметка р. Оби) [4].

Для территории исследования характерен резко континентальный тип климата. Среднегодовая температура воздуха в г. Салехарде за период 1882-1980 составляла минус 7,0 °C, среднегодовое количество осадков – 411 мм [6]. В последние десятилетия наблюдается повышение среднегодовых значений температуры воздуха и количества осадков (рис. 2). Так, в г. Салехарде среднегодовая температура воздуха за последние 50 лет составляет минус 5,7 °C, а среднегодовое количество осадков – 455 мм [7].

Главной водной артерией и базисом эрозии для всей гидрографической сети является р. Обь. Река имеет широкую пойму, которая расчленена протоками. Ширина русла в пределах района исследований колеблется от 1,4 до 2,9 км. Глубина реки 10-19 м. Дно реки песчано-илистое. Ско-

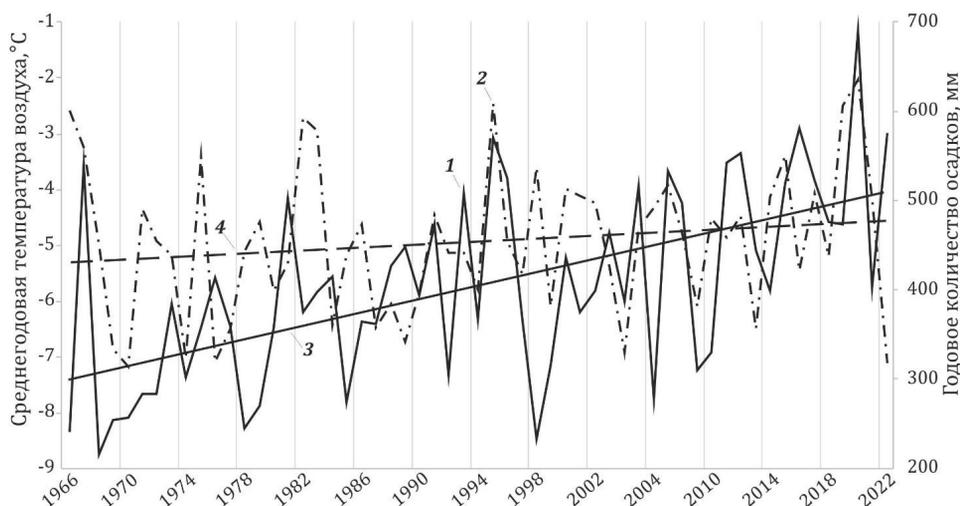


Рис. 2. График многолетней изменчивости (1966–2022 гг.) среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков по данным метеостанции Салехард [7]: 1 — среднегодовая температура воздуха, °С; 2 — среднегодовое количество осадков, мм; 3, 4 — линейные тренды наблюдаемых параметров (температуры и осадков соответственно)

рость течения воды в межень 0,6-0,8 м/с, а в весеннее половодье –1,2 м/с. Крупный правый приток р. Оби – р. Полууй. Река имеет протяженность около 200 км. Ширина русла 250-300 м. Скорость течения водотока колеблется от 0,6 до 0,8 м/с. Вдоль южной окраины г. Салехарда протекает р. Полябта. Долина реки сильно заболочена, покрыта карликовой березкой и мхом. В верхнем течении ширина русла составляет 1 м, а глубина 0,25 м. В среднем течении река имеет долину шириной 20-30 м, берега пологие, дно песчаное, ширина русла равна 3 м, в нижнем течении ширина долины достигает 100 м. Вдоль восточной границы исследуемой территории протекает р. Васьёган. Длина реки 20 км, площадь водосбора 88 км<sup>2</sup>. Она имеет хорошо разработанную долину, с четко выраженной поймой и характеризуется крутым уклоном русла. В меженный период скорость течения и расход воды реки составляют 0,4-0,5 м/с и 400 л/с. Ширина русла до 12 м. глубина составляет 0,3-0,6 м. В пределах городской черты протекает р. Преображенка. Длина реки 9 км, площадь водосбора составляет 31 км<sup>2</sup>. Долина реки в верховьях сильно заболочена и имеет ширину до 8-12 м. Ширина русла от 1 до 3,8 м, глубина от 0,2 до 0,7 м [4]. В северной части города в районе Ангальского мыса протекает руч. Наледный. Длина ручья около 4 км, с притоком около 7 км. Площадь водосбора порядка 10 км<sup>2</sup>. Русло ручья сильноизвилистое и залесенное. В среднем течении ручья наблюдаются высачивания подземных вод, вследствие чего проис-

ходит оползание и обрушение берега. Основными источниками питания поверхностных водотоков являются атмосферные осадки, поэтому режим их неустойчив. Замерзают реки в октябре, а вскрываются в конце мая – начале июня, ледоход сравнительно непродолжителен [4].

В региональном плане район исследования относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с редкими островами талых зон. Талики здесь приурочены преимущественно к руслам рек и имеют как сквозной, так и несквозной характер. Мощность ММП в пределах рассматриваемой территории крайне изменчива и варьирует в зависимости от геоморфологических уровней от 10–20 до 150–200 м [8]. Также характерной особенностью является наличие однослойных и двухслойных ММП и заглубленное залегание мерзлых пород с 2–10 и более метров. Температурный режим пород характеризуется довольно мягкими значениями от минус 3 °С до 1,5 °С. Большая часть территории принадлежит участкам с температурами 0... минус 1 °С, что способствует быстрому переходу пород в талое состояние. Мощность СТС в зависимости от литологического состава варьирует от 0,5 м в торфяниках до 2,5 м в песчаных породах [4].

Территория исследования расположена в пределах северо-западного крыла Западно-Сибирского артезианского бассейна. По вертикальной гидродинамической зональности артезианского бассейна в районе исследования выделяется два гидрогеологических этажа, соответствующих криогенно-таликовому комплексу плиоцен-четвертичных отложений и таликовому комплексу мезозойских отложений. Мощность четвертичных отложений в районе исследований составляет 100–150 м. Они представлены чередованием водоупорных и водопроницаемых пород, не выдержанных по площади и разрезу [9]. По положению водовмещающих пород относительно многолетнемерзлых выделяются следующие типы подземных вод в четвертичных отложениях:

1. Подземные воды сквозных таликов (талые подрусловые отложения р. Оби и ее крупных притоков);
2. Надмерзлотные подземные воды несквозных таликов (мощность талых отложений более 50 м; талики прибрежной части р. Оби, подрусловые талики небольших рек, подозерные талики);
3. Надмерзлотные воды присклоновых таликов (мощность талых отложений от 2 до 50 м; талики распространены повсеместно небольшими по площади участками);
4. Межмерзлотные подземные воды (приурочены к талым отложениям различной мощности среди ММП слоистого строения);
5. Подмерзлотные воды (распространены практически повсеместно, за исключением криогенного водоупора и сквозных таликов) [4].

## *Результаты и обсуждение*

### *Базовые физические и химические характеристики поверхностных и подземных вод г. Салехарда*

Базовые физические и химические характеристики определялись на р. Васьёгане, Преображенке и руч. Наледном в течение летнего периода (с июня по октябрь). В период проведения работ с 20 июня по 24 октября 2023 года температура воздуха колебалась от минус 8,3 до 29 °С [7].

*Температура.* Термический режим рек определяется балансом тепла, поступающим в основном от солнечной радиации, а также размером реки и скоростью ее течения.

Температура воды в р. Васьёгане в летний период 2023 г. изменялась от 7 °С в начале лета, максимум температуры приходился на конец июля—начало августа и составлял 17–20 °С, с середины августа наблюдалось постепенное понижение температуры воды от 12–13 °С до 0 °С в конце октября (начало образования ледяного покрова). При этом отмечается повышение температуры воды вниз по течению за счет расширения русла реки и уменьшения ее глубины. Термический режим верхнего течения р. Преображенки охарактеризован по замерам на правом и левом ее притоках. Температура воды в реке изменялась от 6–8 °С в начале лета, в конце июля—начале августа температура была равной 18–20 °С, далее температура понижалась от 16 °С до 3,5 °С и к концу октября была равной 0 °С. Правый приток реки характеризуется низкими течениями воды (0,03–0,08 м/с), его режим близок к застойному, также в нижнем его течении на левом берегу наблюдаются выходы подземных вод, вероятно, из-за данных факторов температура воды здесь выше на 1–2 °С, чем в левом притоке. Замеры температуры воды в руч. Наледном производились в осенний период. С начала сентября она плавно понижалась от 6,0–6,5 °С до 1,5–2,4 °С в конце октября. Причем температура воды в среднем течении ручья до выхода подземных вод ниже, чем в месте их впадения. Вероятно, более теплые подземные воды влияют на термический режим ручья.

*Электропроводность* (ЕС) природной воды зависит, главным образом, от уровня растворенных в ней минеральных солей. Значения электропроводности позволяют судить об уровне ее минерализации. Средняя электропроводность р. Васьёгана в летний период 2023 г. составляла 61–63 мкСм/см. В середине—конце июня, когда питание реки происходило в основном за счет талой пресной воды, ЕС была равна 34 мкСм/см. При резком понижении уровня воды в реке в июле—начале августа, когда возрастает роль грунтового питания, наблюдались максимальные значения ЕС (75–76 мкСм/см). В августе–сентябре при периодических па-

водках наблюдалось уменьшение электропроводности до 54-62 мкСм/см. Уменьшение ЕС в конце октября в 1,5-2,0 раза (36-37 мкСм/см), вероятно, связано с большим количеством выпавших осадков (63 мм). Для притоков р. Преображенки характерен аналогичный режим изменения электропроводности. Средняя электропроводность правого притока река составляет 58 мкСм/см, левого притока – 71 мкСм/см. Большие значения ЕС на левом притоке реки, вероятнее всего, связаны со сбросом очистными сооружениями сточных вод. В июне ЕС притоков составляла 36-55 мкСм/см, в межень период она возрастала до 87-150 мкСм/см. В августе за счет выпадения дождевых осадков (48 мм) электропроводность понизилась до 42-107 мкСм/см, в сентябре наблюдалось повышение ЕС до 67-135 мкСм/см, а в октябре ее снижение до 42-58 мкСм/см. Воды ручья Наледного отличаются повышенной электропроводностью в сравнении с вышерассмотренными водотоками, также характерной особенностью является увеличение ЕС в сентябре-октябре от 141-155 до 184 мкСм/см. По всей вероятности, в питании этого водотока преобладает грунтовое питание, максимум которого в условиях развития многолетнемерзлых пород приходится на сентябрь–октябрь, что и обуславливает увеличение электропроводности в этот период.

*Водородный показатель* – это один из важнейших показателей качества воды, во многом определяющий характер химических и биологических процессов, происходящих в воде. В зависимости от величины рН может изменяться скорость протекания химических реакций, степень коррозионной агрессивности воды, токсичность загрязняющих веществ и т.д. Значения рН в исследуемых поверхностных водотоках близки. Отмечается единый режим изменения водородного показателя в летний период. В начале лета воды слабокислые и нейтральные (рН – 6,1-6,5), в июле–начале августа, когда наблюдается резкий спад уровня и повышение минерализации, воды кислые (рН – 4,1-4,4), с августа по октябрь воды изменяются от слабокислых и нейтральных (рН 6,3-7,5) до слабощелочных (рН 7,7-8,0).

Таким образом, в летний период 2023 г. поверхностные воды г. Салехарда по температуре были умеренно холодные, ближе к концу летнего периода (октябрь) – весьма холодные и исключительно холодные. По водородному показателю воды рек и ручьев с июня по октябрь изменялись от кислых, слабокислых и нейтральных до слабощелочных. Самая низкая электропроводность характерна для вод р. Васьюгана (34-79 мкСм/см). Электропроводность руч. Наледного, на режим которого, вероятно, в большей степени влияют подземные воды, отличается повышенными значениями (141-184 мкСм/см).

*Химический состав поверхностных и подземных вод г. Салехарда*

Химический состав поверхностных вод охарактеризован по пробам, отобранным в районе гидростворов в августе–начале сентября 2023 г.

На верхнем створе р. Васьегана воды имели гидрокарбонатный кальциево-натриево-магниевый состав (рис. 3). Вниз по течению в катионном составе вод наблюдалось повышение  $Mg^{2+}$ . В августе он был кальциево-магниевым-натриевый, к началу сентября он стал уже магниевым-кальциевым. Минерализация вод колебалась в пределах 66–69 мг/л. В 2002 г. воды имели гидрокарбонатно-магниевый состав [4].

В 2002 г. воды р. Преображенки были по составу гидрокарбонатные, реже сульфатные с минерализацией 85,4–380,7 мг/л [4]. В 2023 г. в среднем течении р. Преображенки (район автомобильного моста) воды имели гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав и минерализацию 100–105 мг/л. Воды правого притока р. Преображенки в августе–сентябре были гидрокарбонатные кальциево-магниевыми. Минерализация в начале августа составляла 78 мг/л, к середине месяца наблюдалось ее повышение до 87 мг/л, а в начале сентября она уменьшилась до 62 мг/л, вероятно, за счет разбавления вод ручья дождевыми осадками и более пресными надмерзлотными водами (табл. 2). В сентябре надмерзлотные воды имели гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриево-магниевый состав и минерализацию 21 мг/л. Воды левого притока р. Преображенки в начале–середине августа имели гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав и минерализацию 117 мг/л. К началу сентября наблюдалось понижение минерализации вод до 103 мг/л за счет уменьшения содержания  $Ca^{2+}$  с 18 до 6 мг/л, соответственно, катионный состав стал кальциево-магниевым-натриевым. Также в начале отмечались повышенные содержания сульфатов до 14 мг/л и аммония до 1,85 мг/л. По-видимому, это связано с периодическим сбросом сточных вод.

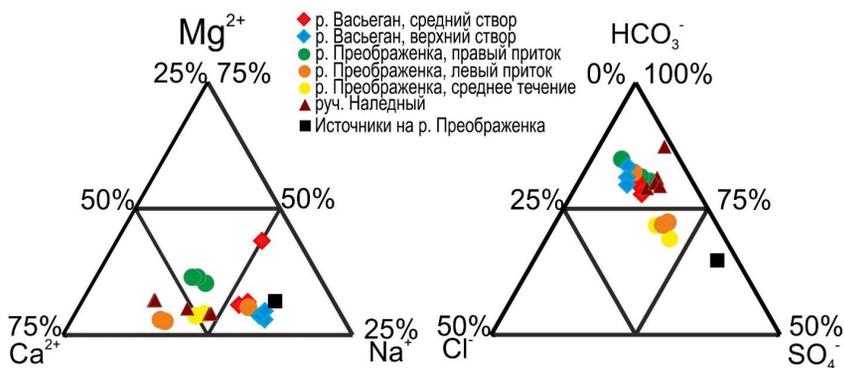


Рис. 3. Треугольные диаграммы Ферре катионного и анионного состава опробованных вод

В ручье Наледном пробы отобраны в сентябре в среднем его течении, в месте разгрузки в ручей подземных вод, в нижнем и среднем течении правого притока и в месте его впадения. Воды ручья Наледного и его притока по составу гидрокарбонатные кальциево-магниевые. По основному руслу ручья вниз по течению отмечается увеличение минерализации вод от 184 до 192 мг/л, вероятно, за счет более минерализованных подземных вод. В левом притоке также наблюдается повышение минерализации от 169 до 181 мг/л.

Важной составляющей комплексных исследований процессов формирования химического состава природных вод является определение содержания микрокомпонентов, что в целом позволяет получить общее представление о поведении элементов и особенностях их накопления в водах [10]. Основными естественными источниками появления микрокомпонентов в природных водах являются горные породы, техногенными – автотранспорт, нефтеперерабатывающая промышленность, металлургия, сельское хозяйство [11].

В 2023 г. было выполнено определение 53 элементов в 24 пробах поверхностных вод и 3 пробах подземных вод. В 2002 г. были определены содержания 18 элементов [4]. Средние концентрации основных микрокомпонентов в опробованных природных водах представлены в табл. 1.

В 2002 г. в водах р. Васьёгана и Преображенки наблюдалось превышение предельно–допустимой концентрации (ПДК) алюминия в 1,2–4,7 раза. В настоящее время превышений данного элемента в поверхностных водах не отмечается.

В общей сложности в 2023 г. в природных водах г. Салехарда отмечается превышение ПДК 11 элементов:

1. Марганец – 1,3–5,5 ПДК (р. Преображенка, руч. Наледный и разгружающиеся в него подземные воды (ПВ2));
2. Железо – 3,5–16,5 ПДК (во всех отобранных пробах);
3. Алюминий – 1,2 ПДК в подземных водах (ПВ2);
4. Молибден – 5 ПДК в подземных водах (ПВ2);
5. Кадмий превышает в десятки и сотни раз ПДК (р. Васьёган, Преображенка, подземные воды (ПВ2));
6. Ниобий – 1,3–2,1 ПДК в верхнем течении р. Васьёган, левом притоке р. Преображенки, подземных водах (ПВ2);
7. Литий – 42,5–903 ПДК во всех водотоках, при этом наибольшие превышения наблюдаются в руч. Наледном и в подземных водах (ПВ2);
8. Бериллий – 34–282 ПДК в поверхностных водах (р. Васьёган, Преображенка, в правом притоке руч. Наледного) и в подземных водах (ПВ2);
9. Рубидий – превышение 3,4–10 ПДК во всех опробованных водах;
10. Сурьма – 1,2–5,6 ПДК (р. Васьёган, Преображенка и подземные воды (ПВ2));

11. Талий – 12-55 ПДК (р. Васьёган, Преображенка, подземные воды (ПВ2)).

Так, в опробованных природных водах наблюдаются превышения 2 элементов I класса опасности (Be, Tl), 5 элементов II класса опасности (Mo, Cd, Nb, Li, Sb) и 3 элементов III класса опасности (Mn, Fe, Al) [12].

Среди опробованных поверхностных водотоков наиболее высокие превышения ПДК микроэлементов отмечены в верхнем течении р. Васьёгана и р. Преображенки за счет сброса в них сточных вод с очистных сооружений. Также подземные воды в северной части города (Ангальский мыс), вероятно, испытывают интенсивное техногенное воздействие, т.к. в данных пробах обнаружены максимальные концентрации многих элементов.

Для природных вод Ямало-Ненецкого автономного округа характерны повышенные содержания железа и марганца, что напрямую связано с влиянием органических веществ. Геохимический облик таких вод определяется высокими концентрациями фульвокислот и гуминовых кислот, с которыми  $Fe^{2+}$  и особенно  $Fe^{3+}$  образуют устойчивые комплексные соединения. Природные воды с высокими концентрациями органических веществ гумусового ряда имеют низкие концентрации карбонатов и характеризуются высокими потенциальными возможностями накопления марганца [13].

Для более полного понимания особенностей формирования микрокомпонентного состава природных вод необходимо расширить площадь исследований, а также опробовать воды в комплексе с другими компонентами естественных и антропогенных ландшафтов (атмосферные осадки, почвы и др.). Данная задача требует отдельных исследований.

Таким образом, опробованные природные воды ультрапресные и пресные, по анионному составу – гидрокарбонатные, смешанные по катионному составу. Анализ микрокомпонентного состава показал, что в опробованных поверхностных и подземных водах в летний период 2023 г. наблюдались превышения ПДК 11 элементов I, II и III класса опасности, что требует организации систематических наблюдений.

Таблица 1. Содержание микрокомпонентов (мкг/л) в поверхностных и подземных водах г. Салехарда в летний период 2002-го и 2023 гг.

Микрокомпоненты	ПДК [12]	Р. Васьёган			Р. Преображенка				
		ср. створ	ср. теч. 2002 г.	верх. створ	ср. теч.	ср. теч. 2002 г.	лев. приток	лев. приток 2002 г.	прав. приток
Br	200	< ПО	<50	< ПО	< ПО	80	< ПО	6	< ПО
B	500	17,5	50	17,4	20,1	51	16,2	53	13,6
As	10	2,0	<1	2,1	3,2	<1	1,8	<1	2,7
Cu	1000	0,8	2	1,2	1,6	4	1,4	3	2,6
Zn	5000	2,3	120	2,3	7,5	78	5,1	34	3,1



*Продолжение таблицы 1*

Микро-компоненты	ПДК [12]	Руч. Наледный					Подземные воды	
		верх. теч.	ср. теч. 2002 г.	пр. приток ниж. теч.	пр. приток, ср. теч.	устье притока	р. Преображенка (ПВ1)	руч. Наледный (ПВ2)
Sr	7000	113	116	117	105	117	6,9	334,8
Nb	10	-	-	-	-	-	-	<b>16</b>
Li	30	<b>3076</b>	<b>3219</b>	<b>2511</b>	<b>2489</b>	<b>2816</b>	<b>1977</b>	<b>27116</b>
Be	0,2	-	-	<b>6,8</b>	-	-	<b>39,6</b>	<b>56,3</b>
Rb	100	<b>405</b>	<b>456</b>	<b>773</b>	<b>744</b>	<b>674</b>	<b>192</b>	<b>1019,1</b>
Sb	50	23,7	23,9	20,5	25,3	24	35,1	<b>283,2</b>
Pl	0,1	-	-	-	-	-	<b>1,4</b>	<b>5,5</b>
U	-	26,9	29,7	13,4	11,7	20,8	5,9	17589

*Примечание: жирным шрифтом выделены превышения ПДК.*

*Расходы воды на гидрометрических постах*

По результатам полевых работ выбраны 4 гидрометрических створа на 2 водотоках (р. Васьюган и р. Преображенка) (рис. 1, 4). На створах были установлены реперы и выполнена их геодезическая привязка. С 20 июня начаты работы по замерам расходов воды на створах.



Рис. 4. Гидрометрические створы: а – среднее течение р. Васьюгана; б – верхнее течение р. Васьюгана; в – правый приток р. Преображенки; г – левый приток р. Преображенки

Специальных гидрометрических работ на мелких водотоках г. Салехарда до 2023 г. не проводилось. Имеются лишь данные разовых замеров. Так, в августе 1977 г. расходы воды на оконтуривающих створах р. Васьёгана и р. Преображенка составляли 1500 и 230 л/с соответственно [2]. В конце июля–начале августа 2002 г. расход воды в среднем течении р. Васьёгана был равен 430 л/с [4]. Стоит отметить, что измерения в 2002 г. проводились с помощью поплавков. Данный метод имеет существенно более низкую точность, чем измерения с помощью гидрометрических вертушек.

Период половодья на изучаемых реках приходится на июнь. В это время наблюдаются максимальные значения расходов воды. Так, расход воды в верхнем течении р. Васьёгана в конце июня составлял 275 л/с. Затем наблюдался резкий спад уровня воды в меженный период и, соответственно, уменьшение ее расхода. Минимальные значения расхода воды в среднем и верхнем течении реки составляли порядка 161-164 и 60-62 л/с соответственно. Периодические повышения расхода воды связаны с летними паводками, вызванными увеличением количества осадков (табл. 2). На конец летнего периода приходятся также высокие расходы воды (140-253 л/с), связанные и с увеличением атмосферного (дождевого) питания и с максимумом грунтового питания. На р. Васьёгане боковая приточность между верхним и средним створом составляет порядка 102-133 л/с и формируется за счет впадающих водотоков. Как видно из таблицы 2, расход воды в среднем течении р. Васьёгана в начале августа 2023 г. меньше значений 2002 г. (192 и 430 л/с соответственно). Данная разница отчасти объясняется разными методиками измерений, также это может быть связано как с межгодовой изменчивостью факторов формирования поверхностного стока, так и с их направленными изменениями, что требует дальнейших исследований.

Таблица 2. Расходы воды на гидрометрических створах в летний период 2023 г.

№№ п/п	Год	Период наблюдений	Осадки, мм	Васьеган, средний створ	Васьеган, верхний створ	Преображенка, правый приток	Преображенка, левый приток
1	2023	01.06.-20.06.	80	-	275	49	148
2		20.06.-19.07.	12,7	218	85	-	20
3		19.07.-03.08.	13,1	192	76	21	18
4		03.08.-10.08.	0,4	164	62	18	17
5		10.08.-28.08.	47,6	223	106	45	28
6		28.08.-06.09.	0	171	61	28	20
7		06.09.-14.09.	0	161	60	24	17
8		14.09.-29.09.	31,6	253	140	46	37

Расход на левом притоке р. Преображенки в конце июня был равен 148 л/с, в июле уровень воды понизился в более чем два раза, и расход колебался в пределах 17-28 л/с, в конце сентября наблюдалось небольшое его увеличение до 37 л/с. Режим правого притока р. Преображенки, вероятно, «зарегулирован» подземными водами. Колебания уровня и расхода в течение летнего периода незначительны и составляют 0,3-0,5 м и 18-49 л/с соответственно. Суммарный расход воды в верхнем течении р. Преображенки в конце летнего периода 2023 г. составлял порядка 83 л/с.

Таким образом, проведение гидрометрических работ позволило выявить особенности летнего режима поверхностных водотоков г. Салехарда, а также установить участие подземных вод в формировании их стока.

### *Заключение*

В летний период 2023 г. в г. Салехарде были проведены гидрологические исследования для ориентировочной оценки естественных ресурсов подземных вод и характеристики условий их питания и разгрузки.

Поверхностные воды с июня по октябрь по температуре были умеренно холодные, весьма холодные и исключительно холодные. По водородному показателю воды рек и ручьев изменялись от кислых, слабокислых и нейтральных до слабощелочных. Электропроводность водотоков изменяется от 34-79 мкСм/см (р. Васьюган) до 141-184 мкСм/см (руч. Наледный).

По химическому составу опробованные воды гидрокарбонатные, смешанные по катионному составу с минерализацией 66-192 мг/л (ультрапресные и пресные). Анализ микрокомпонентного состава показал, что в опробованных поверхностных и подземных водах наблюдались превышения ПДК 11 элементов: Mn, Fe, Al, Mo, Cd, Nb, Li, Be, Rb, Sb, Tl, что связано как с естественными факторами (повышенные содержания железа и марганца), так и с техногенными воздействиями, что требует организации систематических наблюдений.

Расходы воды на конец летнего периода составляли 140-253 л/с (верхнее и среднее течение р. Васьюгана) и 83 л/с (суммарный расход левого и правого притоков р. Преображенки).

По берегам р. Преображенки и руч. Наледного были обнаружены выходы подземных вод. Анализ температурного режима, химического состава и расходов воды подтвердил участие подземных вод в формировании стока этих водотоков, поэтому данные участки являются перспективными для организации мониторинговых гидрогеологических пунктов.

---

**Список источников**

---

1. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
2. Шастин А.М. и др. Отчет Салехардского гидрогеологического отряда ПКГРЭ о результатах стационарных режимных наблюдений на Салехардской комплексной гидрогеологической и инженерно-геологической станции за период с 1976-1990 гг. – Лабытнанги, 1991. – 590 с.
3. Максимов В.М. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 2/ В.М. Максимов и др. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
4. Отчёт по комплексной гидрогеологической, инженерно-геологической и геоэкологической съёмке. М. 1:50 000 листа Q-42-50-A (Салехард). – Екатеринбург, 2004. – 204 с.
5. ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб». – Москва: Стройиздат, 2020. – 36 с.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 17. Тюменская и Омская области. – Л.: Гидрометеиздат, 1998. – 703 с.
7. <https://meteo.ru/>
8. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова – М.: Недра, 1989. – 454 с.
9. Гидрогеология СССР/ред. В.А. Нуднер. Т. XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области). – М., Недра, 1970. – 368 с.
10. Мониторинг качества подземных вод в поселке Листвянка (юго-западное побережье озера Байкал) / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, П.А. Шолохов, А.М. Кононов // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – № 2.
11. Алексеев А.И. Химия воды (теория, свойства, применение) / А.И. Алексеев, М.В. Серeda, С. Юзвяк. – СПб: СЗТУ, 2001. – 180 с.
12. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы.
13. Бешенцев В.А., Иванов Ю.К., Бешенцева О.Г. Экология подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа/Институт геологии и геохимии УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – 165 с.

---

**Сведения об авторах**

---

**Паламарчук Валентина Анатольевна**, 1997 г.р., окончила Тюменский индустриальный университет по специальности «геология» в 2022 году. С 2022 года в ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард, Россия), младший научный сотрудник. Область научных

интересов: мерзлотоведение, талики, подземные воды криолитозоны, песчаные массивы криолитозоны.

**Башкова Анна Александровна**, 1974 г.р., окончила Ангарскую государственную техническую академию по специальности «химическая переработка топлива и углеродосодержащих материалов», квалификация «инженер». С 2022 года в ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард, Россия), научный сотрудник. Область научных интересов: Арктика, мерзлотоведение, гидрогеология, строительство.

### *Участие авторов*

---

Паламарчук В.А. – сбор и обработка материала, работа с текстом;

Башкова А.А. – сбор и обработка материала, работа с текстом.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 12.11.2022 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 12, 2022, accepted for publication on December 7, 2023.

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 55-71.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 55-71.

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 550.822: 504.05: 624.131.3

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004

### ИЗУЧЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОД ЗДАНИЯМИ НА ЗАСТРОЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

*Антон Сергеевич Губарев<sup>1</sup>, Антон Иванович Синуцкий<sup>2</sup>,  
Владимир Федорович Ребенков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2,3</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>1</sup>antongubareff@yahoo.com

<sup>2</sup>AIsinitskii@yanao.ru

<sup>3</sup>VFRebenkov@yanao.ru

**Аннотация.** В статье представлены материалы геотехнического обследования аварийного капитального здания тира, который является важным спортивным сооружением для города Салехарда. Сооружение построено в 2000 г. с использованием грунтов основания в мерзлом состоянии. В процессе эксплуатации объекта были выявлены существенные деформации строительных конструкций, в т.ч. массовое распространение продольных, диагональных трещин с раскрытием как в свайном фундаменте, так и в самом здании. В работе проведен ретроспективный анализ возможных инженерно-геокриологических условий в период строительства сооружения, а также рассмотрены причины, повлиявшие на их изменения.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлый грунт, температура грунтов, свайный фундамент, проветриваемое подполье, геотехнический мониторинг.

**Цитирование:** Губарев А.С., Синицкий А.И., Ребенков В.Ф. Изучение специфических факторов формирования температурного поля под зданиями на застроенной территории// Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 55–71. Doi 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004.

Original article

## INVESTIGATION OF SPECIFIC FACTORS FORMING FROZEN GROUND TEMPERATURE FIELDS UNDER BUILDINGS IN THE URBAN TERRITORY

*Anton S.Gubarev<sup>1</sup>, Anton I.Sinitsky<sup>2</sup>, Vladimir F.Rebenkov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2,3</sup>*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

<sup>1</sup>*antongubareff@yahoo.com*

<sup>2</sup>*AISinitskii@yanao.ru*

<sup>3</sup>*VFRebenkov@yanao.ru*

**Abstract.** The article presents results of geotechnical observations in shooting range building which is a vital sport facility for Salekhard. The building was completed in 2000 with using soil according. However in building have been appearing deformations in construction during the its exploration period. The article provides a long-term analysis of possible permafrost conditions before building and reasons which affected on its changes.

**Keywords:** permafrost, frozen ground temperature, pile foundation, ventilated underground, geotechnical monitoring.

**Citation:** Gubarev A.S., Sinitsky A.I., Rebenkov V.F. Investigation of specific factors forming frozen ground temperature fields under buildings in the urban territory// Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. 2023. (121). No. 4. P. 55–71. Doi 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004.

### *Введение*

Обследуемое здание «Спортивное сооружение ТИР» построено в 2000 году на свайном фундаменте. Согласно материалам технического заключения, сооружение представляет собой одноэтажное здание с размерами в плане 7,35×67,9 м с проветриваемым техническим подпольем, высота которого изменяется от 1,2 до 2,6 м в северном направлении. Проветриваемое подполье оборудовано термосваями, заполненными керосином в качестве хладагента, в рамках предусмотренных мер технической мелиорации по регулированию мерзлотной обстановки грунта на объекте. Наружные и внутренние несущие стены выполнены из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе. Водоотвод с кровли наружный, неорганизованный. Здание с холодным чердаком и неотапливаемым проветриваемым подпольем. Поверхность земли вблизи здания спланированная, выдержанная, без существенных перепадов абсолютных отметок.

Конструктивная схема здания – однопролётное с продольными несущими стенами. Перекрытие над проветриваемым подпольем выполнено из сборных многопустотных железобетонных плит размерами 6000×1200×220 мм и 6000×1500×220 мм с утеплением из керамзита толщиной 330 мм. Фундамент из свай С120.30 серии 1.011.1-10 в. 1, объединенных сверху ж/б ростверком, состоящим из 24 монолитных балок ( $l=6,23$  м). Грунты основания используются по I принципу, согласно п. 6.1. СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах [1].

В период визуального осмотра (сентябрь 2023 года) в конструкциях здания зафиксированы деформации (рис. 1), влияющие на дальнейшую безаварийную эксплуатацию сооружения. Для определения текущего состояния и свойств грунтового массива под объектом в августе 2023 года были оборудованы четыре горные выработки с отбором образцов грунта в процессе бурения. Все скважины имеют глубину чуть более 12 метров, которые равномерно распределены под зданием и на сегодня подключены к системе автоматизированного контроля температуры мерзлых грунтов под объектами капитального строительства (система автоматизированного геокриологического мониторинга ГИС Ямал-Арктика).



Рис. 1. Раскрытие деформационного шва в ростверке фундамента здания ТИРа (фото из архивов Научного центра изучения Арктики)

### *Методика исследования*

Методика работы, проводившейся в рамках данной статьи, состояла из следующих этапов:

1. Визуальный осмотр сооружения «ТИР» и прилегающей к нему территории на предмет наличия негативных конструктивных проявлений в здании и инженерно-геологических процессов и явлений.

2. Обеспечение здания сетью геотехнического мониторинга, представленной термометрическими скважинами, глубиной до 12 м с установлением в них термометрических кос с логгерами, записывающими данные каждые 3 часа, с фиксацией данных в единой базе «САМ-Мерзлота» (ИП Кураков С.А.).

3. Изучение инженерно-геологических изысканий, технического заключения по результатам комплексного инструментального обследования грунтов основания и конструктивных элементов здания, проводившихся непосредственно для данного здания в зимний период 2020 года; инженерно-геологических изысканий по близлежащим зданиям Преображенского собора и МБУК ЦКиС «Геолог» с целью уточнения геологических и мерзлотных условий данных объектов. Изучение топографических карт местности прошлых лет для уточнения изначальных ландшафтно-мерзлотных условий.

4. Проведение теплотехнических расчетов посредством программы «QFrost» для рассмотрения различных комбинаций факторов, формирующих температурное поле, при различных изначальных геокриологических условиях на изучаемой площадке (тип распространения пород, среднегодовые температуры пород, тип покровов).

### *Инженерно-геокриологические условия и температурный анализ территории объекта*

Ознакомившись с топографическими картами города Салехарда начала 2000-х годов, удалось выяснить, что здание находилось вблизи оврага, имевшего сток в р. Преображенку (ранее – Шайтанка, рис. 2). Опираясь на региональные мерзлотные закономерности [2], можно сказать, что здесь был участок недр, характеризующийся наличием талых грунтов или наличием несливающейся мерзлоты.

Анализ повторных инженерно-геологических изысканий [3], которые проводились в январе 2020 года, показал, что основание сооружения сложено преимущественно песками пылеватыми и мелкими с естественной влажностью в пределах 0,07-0,29 д.ед. и коэффициентом водонасыщения до 1,19 д.ед. При этом наблюдается повышение этих параметров с глубиной.

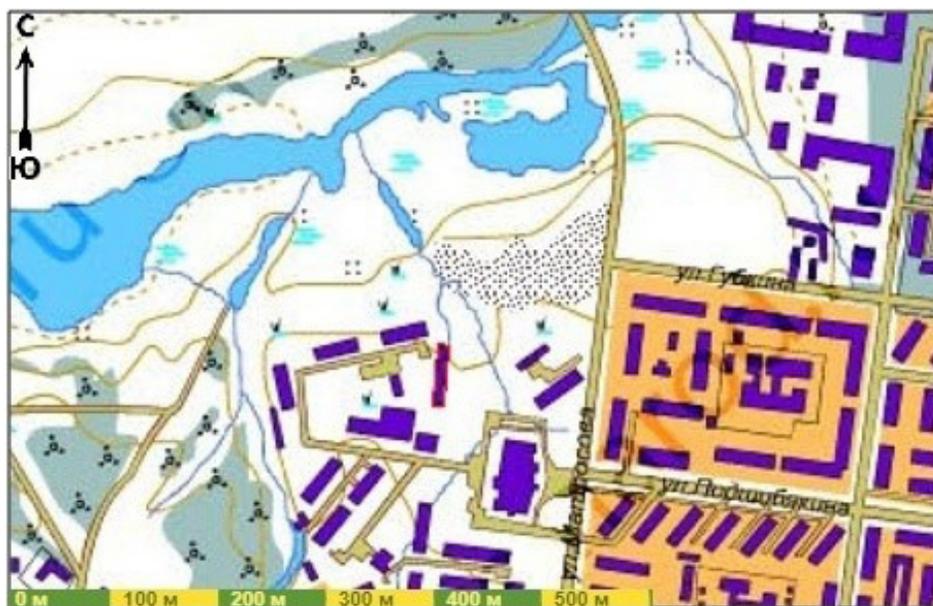


Рис. 2. Фрагмент карты г. Салехарда из начала 2000-х годов. Красным выделено здание ТИР (источник: <http://map-site.narod.ru>)

На объекте «Спортивное сооружение ТИР» в период обследования во всех четырех дополнительно пробуренных скважинах было установлено измерительное оборудование (термокосы) ООО «РУСГЕОТЕХ» и ИП Кураков С.А. Термометрические данные со скважин в режиме онлайн передавались в систему автоматизированного геокриологического мониторинга ГИС Ямал-Арктика в период с 15 августа по 11 сентября 2023 года и с интервалом 6 часов.

Температурный мониторинг грунтов оснований показал, что наиболее высокие значения наблюдаются в термометрической скважине 4 (далее – ТС 4), расположенной возле юго-западного угла здания. Три остальные скважины, расположенные в центральной и северной частях проветриваемого подполья, имеют схожие между собой показания температуры грунтов (рис. 3-6, табл. 1).

По результатам проводившихся температурных замеров выяснилось, что использование грунтов по I принципу согласно СП 25.13330.2020 на объекте в дальнейшем не целесообразно. Грунты оснований по всей глубине инженерных изысканий (более 12 метров) находятся в талом состоянии ( $T > T_{bf}$ ) с незначительными прослоями, где отмечаются отрицательные температуры. Существует вероятность, что в данных интервалах грунты также немерзлые, так как их температура отличается от 0 на значения, не превышающие инструментальную погрешность термометрических кос.

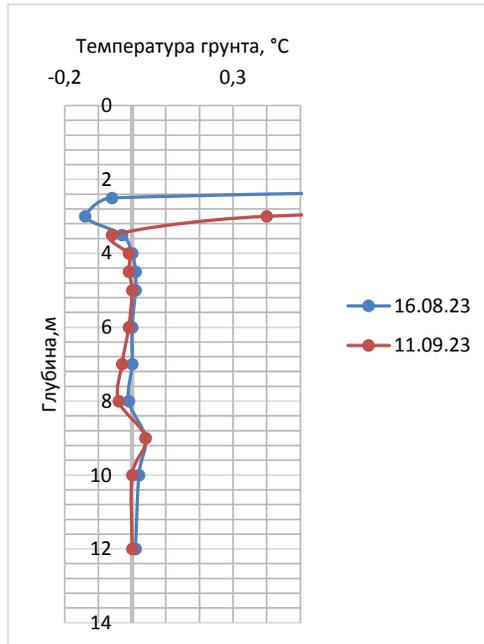


Рис. 3. Температура грунтов в ТС 1 16.08.23 и 11.09.2023 г.

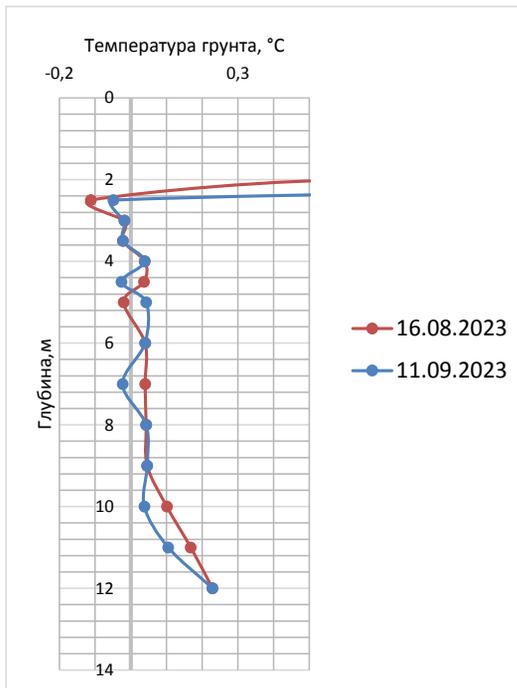


Рис. 4. Температура грунтов в ТС 2 16.08.23 и 11.09.2023 г.

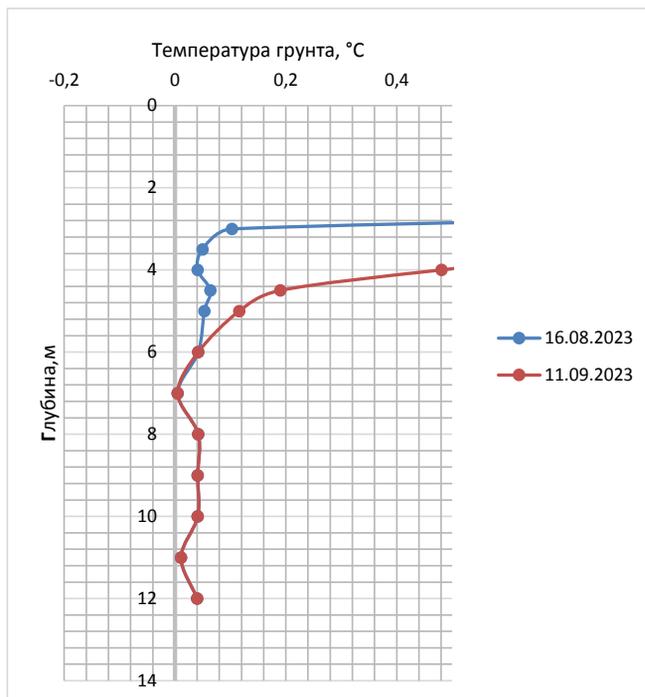


Рис. 5. Температура грунтов в ТС 3 16.08.23 и 11.09.2023 г.

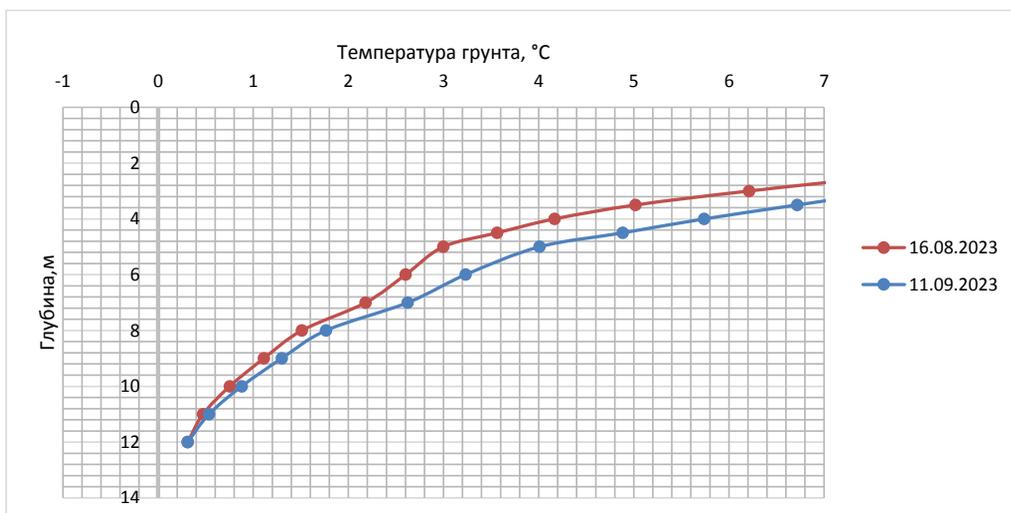


Рис. 6. Температура грунтов в ТС 4 16.08.23 и 11.09.2023 г.

Таблица 1. Значения средней температуры грунтов в интервале глубин 3-10 м для каждой из 4 термометрических скважин согласно замерам температуры грунта в 2023 г.

	16.08.2023	11.09.2023
ТС 1	-0,01	0,03
ТС 2	0,03	0,02
ТС 3	0,05	0,37
ТС 4	3,01	3,89

Если сравнить среднюю температуру грунтов в интервале глубин 3-10 м (табл. 1), можно установить, что она неотрицательная и, соответственно, выше любых проектных величин, принятых для свайного фундамента с использованием грунтов оснований по I принципу.

Одной из возможных причин повышенной температуры в скважине ТС 4 может являться снегонакопление, появляющееся здесь каждую зиму. Мощные снегоотвалы в городской застройке имеют существенное влияние на рост температуры мерзлых грунтов [4]. Однако данный фактор не является основным в формировании температурного режима в рассматриваемом случае, так как на значительных глубинах (5-7 м) температура грунта также гораздо выше +1 °С.

### *Теплотехнические расчеты*

Для выявления факторов, влияющих на температурный режим грунтов под зданием, были проведены теплотехнические расчеты. К сожалению, информация об инженерно-геологических изысканиях, проводившихся на предпроектном этапе, у авторов отсутствует. Целью выполнения теплотехнических расчётов было выявление изначальных геокриологических условий, а также каким образом поверхностные условия могли повлиять на температурный режим грунтов оснований сооружения.

Первоначально была рассмотрена ситуация, при которой грунты на обследуемую мощность (30 м) находились в мерзлом состоянии при наиболее вероятных параметрах среднегодовой температуры для района г. Салехарда: с  $T_0 = -0,2...-1,0$  °С. Ниже представлены параметры условий на поверхности, использованные при расчетах (табл. 2). Температура воздуха до строительства объекта рассчитывалась средней за период 1970-2000 год, а при последующей эксплуатации принималась уже средняя величина за период 2000-2020 годы [5]. Климатическая норма толщины снежного покрова взята из научно-прикладного справочника по климату СССР [6], теплопроводность снежного покрова рассчитывалась по формуле  $\lambda_s = 9.165 \cdot 10^{-2} - 3.814 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_s + 2.905 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_s^2$  [7].

Рассмотрена задача, где на первом этапе в качестве толщины снегоотвала была принята толщина в 3 раза больше среднемесячных показателей (максимальное значение 2,85 м, значение подкрепляется свидетельствами очевидцев). В двумерной модели выбрано расчетное поле размером 17х30 м, где по краям участка по 5 метров представлены с повышенным снегонакоплением (снегоотвалами), а посередине расположено здание с проветриваемым подпольем. Температура для подполья  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  от среднемесячной температуры наружного воздуха, коэффициент теплообмена  $2,57\text{ Вт/м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Была рассмотрена сторона сооружения, где расположена наиболее теплая скважина ТС 4. Данные по геологическому строению в модели заложены на основе инженерно-геологических изысканий, проведенных на объекте в январе 2020 года.

Таблица 2. Характеристики граничных условий третьего рода на поверхности моделируемого грунтового массива при различных предпостроечных инженерно-геокриологических условиях

	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Тв до 2000 года, $^{\circ}\text{C}$	-24,2	-23,3	-15,2	-9,3	-1,2	8,4	14,3	10,9	5,2	-4,5	-15,6	-20,6
Коэф. теплообмена ( $\text{Вт/м}^2\text{K}$ ) для грунта с $T_0=-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,40	0,36	0,33	0,38	0,62	5	5	5	5	1,34	0,62	0,44
Коэф. теплообмена ( $\text{Вт/м}^2\text{K}$ ) для грунта с $T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (талики на глубине 4-9 м)	0,4	0,37	0,33	0,38	0,62	7	7	7	7	1,41	0,64	0,44

В результате расчётов было определено, что даже при максимально экстремальной постановке задачи ( $T_0=-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , мощность снегоотвала до 3 м, период эксплуатации 20 лет) невозможно образование таликовой зоны с параметрами (мощность несквозного талика, температура грунтов), полученными как в результате замеров грунта в августе-сентябре 2023 года, так и при изысканиях, выполненных в 2020 году (рис. 7).

Изучая результаты замеров температуры грунта по материалам изысканий 2020 года, можно обнаружить следующие закономерности (рис. 8). Значения температуры грунтов в талой зоне (0-10 м) достигают максимально  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и она уменьшается с юга на север, т.е. от инженерно-геологической скважины ТС 4 к ТС 1. Кроме того, сами значения температуры грунтов высоки, для того чтобы талый горизонт мог быть сформирован только лишь снегоотвалами.

Сравнивая показания замеров температуры грунта в августе-сентябре 2023 года и при инженерно-геологических изысканиях на угловой скважине ТС 4 (рис. 9), можно обнаружить тенденцию к увеличению мощности талой зоны. Аналогичная ситуация наблюдается и на примере термометрической скважины ТС 1 (рис. 10).

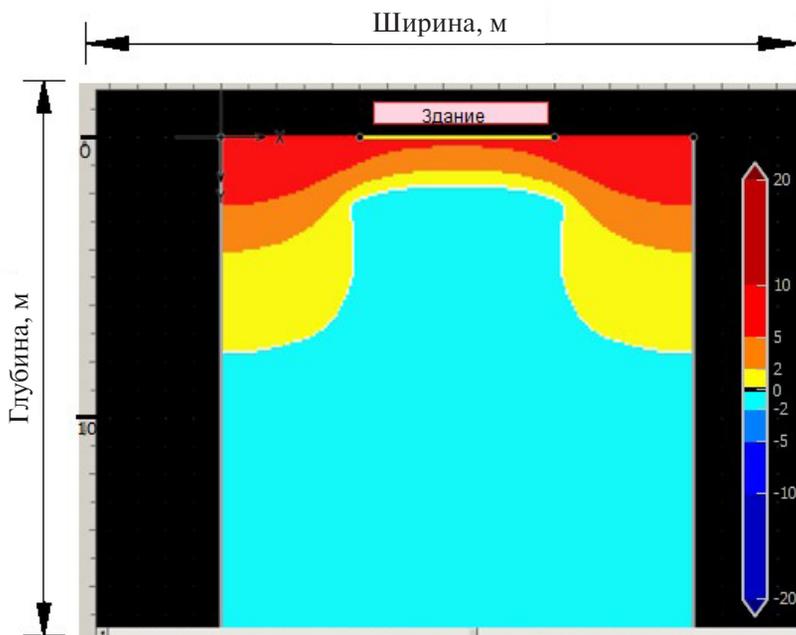


Рис. 7. Визуализация теплотехнических расчетов на 01.09.2020 при изначальных параметрах среднегодовой температуры грунтов равной  $-0,2^{\circ}\text{C}$  и больших по мощности снегоотвалов

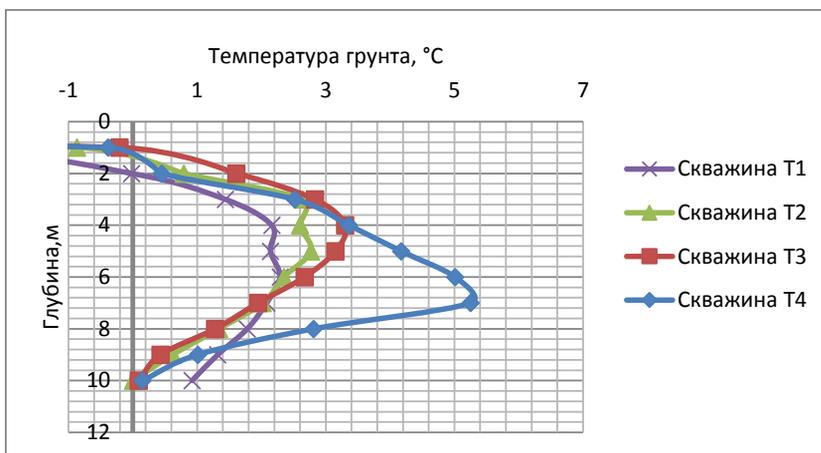


Рис. 8. Температура грунтов по результатам инженерно-геологических изысканий в январе 2020 г.

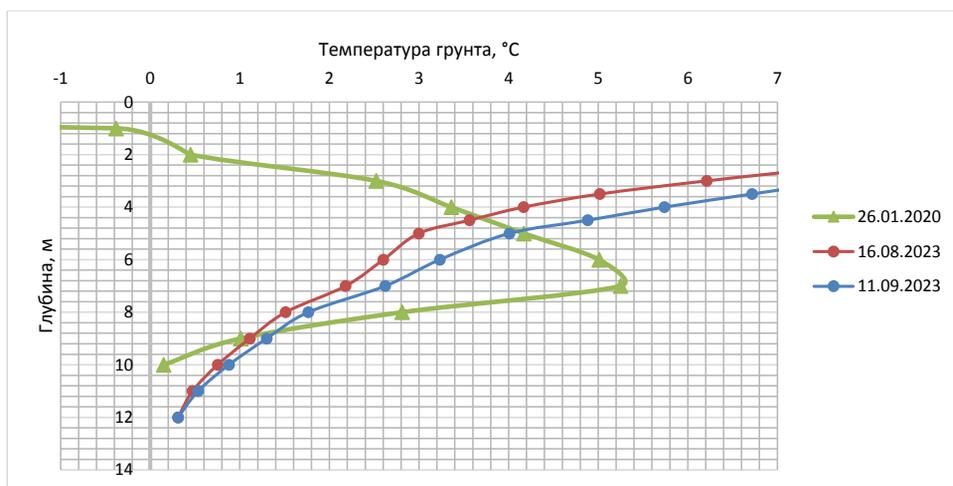


Рис. 9. Сравнительный график значений температуры грунтов в термометрической скважине 4 по результатам инженерно-геологических изысканий января 2020 года и замеров температуры грунтов 16 августа и 11 сентября 2023 г.

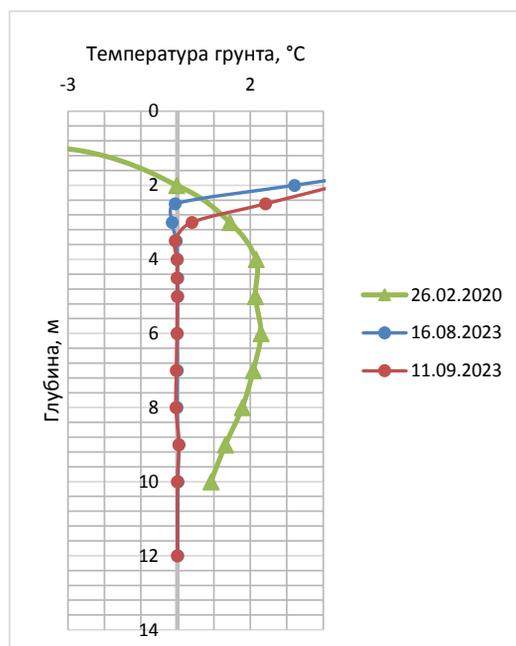


Рис. 10. Сравнительный график значений температуры грунтов в термометрической скважине 1 по результатам инженерно-геологических изысканий января 2020 года и замеров температуры грунтов 16 августа и 11 сентября 2023 г.

Изучив температурный режим и свойства грунтов, а также материалы изысканий по расположенным в непосредственной близости другим объектам капитального строительства – Преображенскому собору и МБУК ЦКиС «Геолог» [8], пришли к выводу, что к моменту постройки здания в геологическом разрезе было двухслойное строение мерзлых пород, и вероятнее всего, на глубинах 3-9 метров мог находиться некий источник тепла, предположительно водный горизонт с температурой  $+4..+5$  °С. Также его можно рассмотреть как талик водно-теплого типа [9]. Надмерзлотные воды в южной части распространения криолитозоны, где мерзлота часто может быть несливающегося типа, могут играть весомую роль в формировании температурных полей грунтов. Так, например, зафиксировано, что в Воркуте, где мерзлотные условия вполне сопоставимы с Салехардом, под зданием, построенным ранее по I принципу, были обнаружены пласты надмерзлотных вод с температурой  $+27$  °С, что привело к формированию чаши оттаивания мощностью 15 м [10]. Гипотеза о тепловом влиянии надмерзлотных вод для сооружения «ТИР» была проверена теплотехническими расчетами (рис. 11, 13). Выполнен сравнительный анализ 2 сценариев вероятной тепловой обстановки: первый вариант с талым горизонтом на глубине 4-9 м, но без дополнительного бокового источника тепла (Прогноз 1), и второй вариант с талым горизонтом на глубине 4-9 м, но с дополнительным боковым источником тепла с постоянной температурой  $+4$  °С (Прогноз 2; рис. 13, 14).

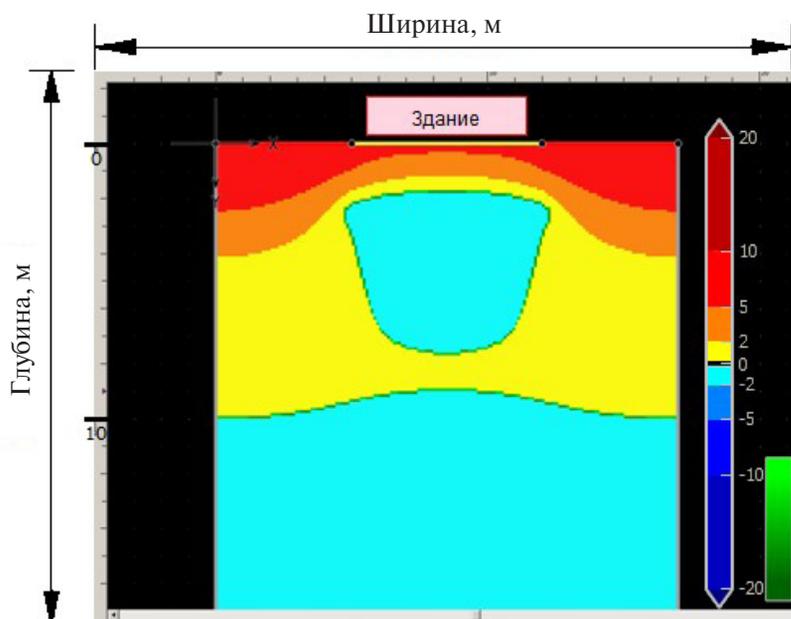


Рис. 11. Результаты теплотехнических расчетов на 01.09.2020 при Прогнозе 1

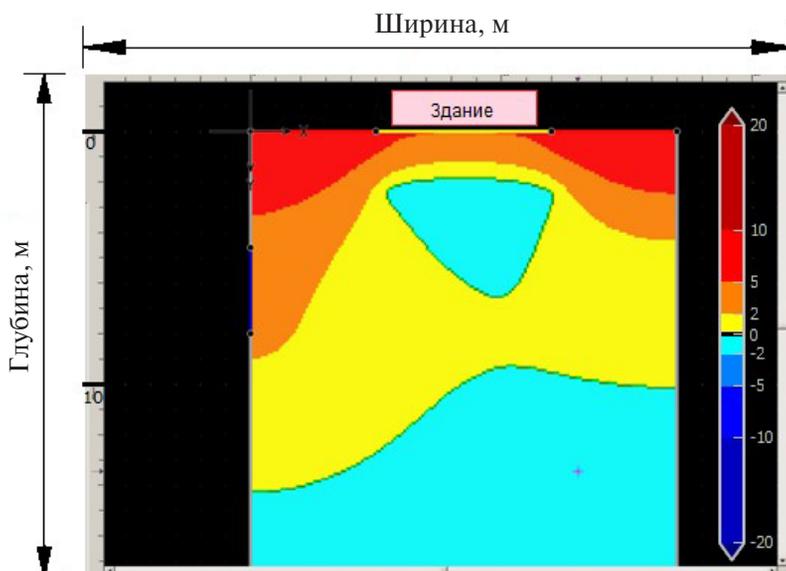


Рис. 12. Результаты теплотехнических расчетов на 11.09.2023 при Прогнозе 2

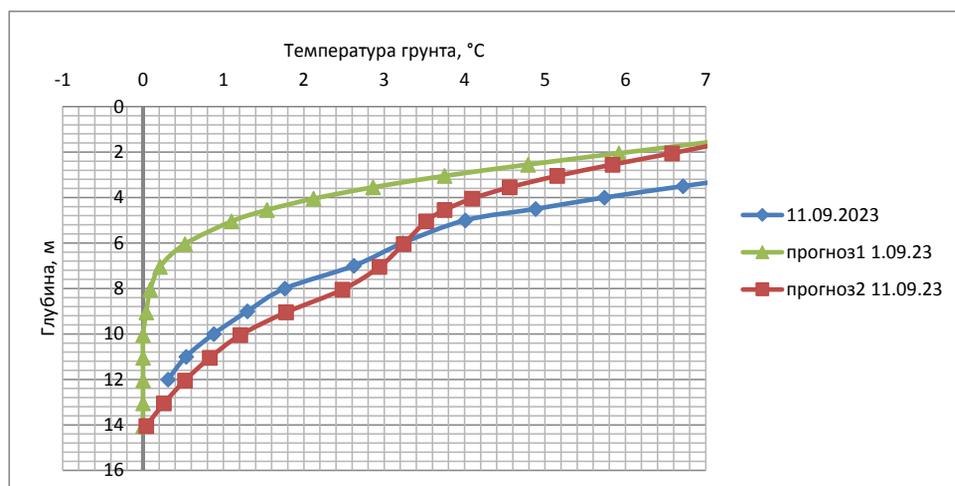


Рисунок 13. Сравнительный график значений температуры грунтов в ТС 4 по результатам замеров температуры грунта 11.09.2023 года и по результатам рассмотренных 2 вариантов теплотехнических расчетов. Прогноз 1, 01.09.23 (зеленая линия)

Как видим на графике, наиболее вероятны к реальности были условия Прогноза 2.

Аналогично, сопоставив значения, полученные в ходе инженерных изысканий и по результатам теплотехнических расчетов, получена хорошая сходимость результатов, из чего следует, что предположение о наличии источника вод с положительными температурами в окрестности сооружения вполне реалистично (рис. 14).

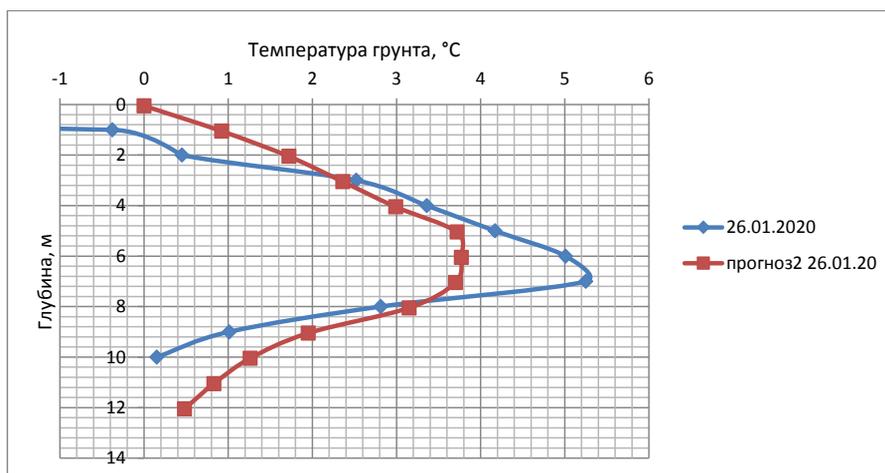


Рис. 14. Сравнительный график значений температуры грунтов в ТС 4 по результатам инженерно-геологических изысканий 26.01.2020 и по результатам теплотехнических расчетов согласно Прогнозу 2

Отметим, что согласно предположению о факторах, формирующих температурное поле под зданием «Спортивное сооружение ТИР», были проведены аналогичные расчеты для случая, когда изначально грунты основания могли быть в мерзлом состоянии со среднегодовой температурой  $-0,2^{\circ}\text{C}$ . В результате более чем за 20-летний период при стороннем источнике тепла могло сформироваться температурное поле под объектом исследований, аналогичное зафиксированному инструментально. Однако, ориентируясь на ландшафтные условия площадки, наиболее вероятным кажется изначально двухслойное строение многолетнемерзлых пород (далее – ММП).

### *Заключение и рекомендации*

На основе анализа архивных материалов по объекту, полученных в результате инженерно-геологических изысканий, технических осмотров, натурных работ по геотехническому мониторингу, проведенных теплофизических расчетов удалось выяснить следующее:

1. Перед постройкой здания «ТИР» в 2000 году территория характеризовалась сложными для строительства геокриологическими условиями в связи с близостью оврага, расположенного в долинном комплексе р. Преображенки (ранее – р. Шайтанка). Очевидно, что здесь был участок с заглубленной кровлей ММП.

2. В настоящее время под зданием «Спортивное сооружение ТИР» наблюдается чаша оттаивания мощностью более 12 м, что, возможно, привело к конструктивным деформациям здания.

3. На основе анализа сравнения различных причин, повлиявших на оттаивание грунтов, удалось установить, что источник тепла находится на глубине более 4 м и предположительно может являться пластом надмерзлотных вод. Поверхностные условия, например, мощные снегоотвалы, не могли являться существенным источником оттаивания грунтов в окрестностях изучаемого объекта, как было рассмотрено выше.

Весьма спорным здесь является дальнейшее использование грунтов по I принципу, согласно п. 6.1. СП 25.13330.2020 [1], которые находятся в талом состоянии на всю глубину инженерных изысканий (до 12 метров и более).

Рекомендуется проведение комплекса изыскательских работ (колонковое бурение, статическое зондирование, геофизические работы) для установления свойств грунтов и гидрогеологической обстановки на текущее время.

Необходимо проводить регулярный геотехнический мониторинг, включающий в себя не только замеры температуры грунтов в оборудованных скважинах, но и установку деформационных марок на ростверки свайного фундамента для его геодезической нивелировки. Особенно это актуально по причине установки сезонноохлаждающих устройств в талых водонасыщенных грунтах по всему периметру здания, которые могут при промерзании неравномерно вспучиваться и приводить к новым деформациям здания.

### *Список источников*

---

1. СП. 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
2. Фирсов Н.Г., Кашперюк П.И., Кудряшов В.Г., Трофимов В.Т., Геокриологическая характеристика Центральной зоны Континентального региона. Обь-Надымская область // Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – С. 278–284.
3. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте «Спортивное сооружение ТИР» МАУ «Спортивная школа «Фаворит» по адресу: г. Салехард, ул. Губкина, 4а. – Владимир, 2020. – 27 с.

4. Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского Университета. Серия 5: География, 2022, № 2, с. 25-36.
5. Научно-прикладной справочник «Климат России»: [электронный ресурс]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/>.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 17 / Омское территориальное упр. гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1998. – 702 с.
7. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 60–68.
8. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий «Храмовый комплекс в честь Преображения Господня в г. Салехарде. I этап. Храм в честь Преображения Господня». Том 2. – Омск, 2019. – 136 с.
9. Закономерности формирования таликов и прогноз их образования // Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях/ Под ред. Гарагули Л.С., Брушкова А.В. – М.: Издательство «Геоинфо», 2016. – С. 366-400.
10. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. – М.: Наука, 1971. – 167 с.

### *Сведения об авторах*

---

**Губарев Антон Сергеевич**, аспирант географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра криолитологии и гляциологии. Сфера научных интересов: геотехнический мониторинг, геотехника в криолитозоне, мерзлотные условия на застроенных территориях.

**Синицкий Антон Иванович**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник сектора геотехники ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Сфера научных интересов: натурные испытания талых грунтов, технологии термостабилизации грунтов, геотехника в криолитозоне, изучение трансформации многолетнемерзлых пород под влиянием климатических изменений и антропогенной нагрузки, геокриологический мониторинг, проектное управление.

**Ребенков Владимир Федорович**, инженер по буровым работам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Сфера научных интересов: геотехника, инженерные изыскания и мониторинг грунтовых условий в криолитозоне, вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике.

---

***Участие авторов***

---

Губарев А.С. – сбор, обработка данных инженерно-геологических изысканий, технического заключения по результатам комплексного инструментального обследования грунтов основания и конструктивных элементов здания, температурный мониторинг объекта, теплотехнические расчеты, написание текста статьи;

Синицкий А.И. – натурное обследование проветриваемого подполья и свайного фундамента здания, температурный мониторинг объекта, подготовка и предоставление необходимых аналитических материалов, редакторская правка текста статьи;

Ребенков В.Ф. – проведение визуального осмотра и термометрических работ на объекте, оборудование объекта сетью геотехнического мониторинга, подготовка аналитических документов по объекту изучения.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 15, 20223, accepted for publication on December 7, 2023.



**ПРИМЕНЕНИЕ  
НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРКТИКЕ**

---

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 74-82.  
Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 74-82.

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРКТИКЕ

Научная статья  
УДК 902.3, 528.7  
doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.005

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ МЕСТНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ ТАХЕОМЕТРИИ И ФОТОГРАММЕТРИИ В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*Даниил Сергеевич Тупахин*

*Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

*dantupahin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9024-6298>*

**Аннотация.** В работе приводится сопоставление двух методов топографической съемки местности для решения задач топографического обеспечения в рамках полевых археологических исследований – классической инструментальной съемки при помощи тахеометра и инновационной методики, основанной на использовании методов фотограмметрии, с использованием в исходных данных набора фотографий, полученных при помощи беспилотных летательных аппаратов. Исходя из практического опыта применения, сделаны выводы о плюсах и минусах применения каждого метода, описаны ограничения их применения в рамках практических полевых изысканий.

**Ключевые слова:** фотограмметрия, БПЛА, топография, полевые археологические исследования, тахеометрическая съемка.

**Цитирование:** Тупахин Д.С. Сравнительный анализ топографической съемки местности при помощи методов тахеометрии и фотограмметрии в археологических исследованиях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 74–82. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.005.

Original article

## A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TOPOGRAPHIC SURVEY IN ARCHAEOLOGY — TOTAL STATION AND PHOTOGRAMMETRY

***Daniel S. Tupakhin***

*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

*dantupahin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9024-6298>*

**Abstract.** The paper presents a comparative analysis of two methods of topographic survey applicable for topographic support in the field of archaeological research – classical instrumental survey using a total station and an innovative technique based on the use of photogrammetry methods, using a set of photos obtained using unmanned aerial vehicles in the initial data. Based on the practical experience of application, conclusions are drawn about the pros and cons of using each method, the limitations of their application in the framework of practical field surveys are described.

**Keywords:** photogrammetry, UAV, topography, archaeological field research, total station survey.

**Citation:** D. S. Tupakhin, A comparative analysis of the topographic survey in archaeology – total station and photogrammetry // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 74–82. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.005.

### ***Введение***

Топографические работы являются важной неотъемлемой частью комплекса полевых археологических исследований. Топографическое описание позволяет в графическом виде описать ландшафтный и растительный контекст, к которому привязан археологический комплекс, составить корректное представление о его особенностях, а в дальнейшем четко локализовать комплекс в природном интерьере. Неслучайно топографическая съемка является важным элементом исследования при всех видах археологических работ, в том числе и работ, не связанных с земляными работами. Стоит отметить, что с развитием технологического процесса инструменты для топографии стремительно развиваются, вследствие чего в практическую работу вводятся все новые и новые методики. К числу основных показателей, важных с точки зрения археолога-практика, мы

относим такие показатели, как качество и точность съемки, скорость работы, автономность в условиях экспедиции, мобильность инструментария, скорость обработки «сырых» исходных данных в камеральных условиях. В данной работе мы хотели бы остановиться на наиболее распространенных в настоящее время методиках – лазерной тахеометрической съемке и фотограмметрии, сравнить данные методики с точки зрения практического использования, определить круг задач, решаемых при их использовании.

### *Объекты и методы исследования*

Тахеометрическая лазерная съемка является развитием классической инструментальной съемки, где часть операций, таких как измерение расстояния и высоты, реализована в виде автоматических режимов. Также важной деталью работы является реализация работы с данными (обработка, сохранение и отображение) в цифровом виде, не требующем дополнительных действий по пересчету данных и занесению их в полевой дневник, ведения в полевых условиях чертежно-графической документации. Развитие технологий в настоящее время привело к тому, что тахеометр прочно вошел в обиход исследователей-археологов, практически вытеснив собой классические для XX века оптические приборы, а топографическое сопровождение всего цикла археологических исследований начиная с 2000-х гг. перешло в цифровой формат. В целом комплекс топографического сопровождения археологических работ, являющегося необходимым требованием, при проведении всех без исключения видов археологических исследований можно разделить на два ключевых раздела. К первому относится топографическая съемка по площади археологического памятника и фиксация характерных высот вмещающего памятник ландшафта, включая в ряде случаев съемку микрорельефа, с шагом съемки между пикетами около 0,5 м, что позволяет выделить незаметные в залесенном или заросшем травой или кустарником рельефе характерные перепады высот, маркирующие археологические объекты. Ко второму следует отнести сопроводительную инструментальную съемку, которая ведется непосредственно в ходе археологических раскопок, при которой с привязкой к топографическому плану отмечаются раскопы, высоты выбранных условных горизонтов (как правило, по сетке с шагом 1 м), в границах шурфов и раскопов фиксируются все найденные артефакты, конструкции, а также важные для понимания стратиграфической, планиграфической ситуации и контекста конкретного археологического комплекса, особенности.

Начало XXI века ознаменовалось стремительной эволюцией беспилотных летательных аппаратов, что в свою очередь кардинально поме-

няло доступность и эффективность систем аэрофотосъемки. Применение аэрофотосъемки для решения задач археологии не ново и имеет за собой долгую историю, однако до недавнего времени эти задачи отличались неприемлемо высокой стоимостью и сложностями, связанными с технической реализацией процесса аэросъемки. В последние полтора десятилетия же случился настоящий бум применения беспилотных летательных аппаратов для самых разных прикладных задач научных исследований, в том числе и для задач археологии, что прослеживается по целому ряду исследовательских работ, методики съемки совершенствуются и развиваются [1, 2, 3]. Наряду с аэрофотосъемкой, повышающей информативность и наглядность сопроводительной документации, в сравнении с наземной фотографией активное развитие получает применение методов фотограмметрии – построения цифровых объемных моделей объектов, основанных на наборе снятых под разными ракурсами фото. В целом фотограмметрия как отдельная научно-техническая дисциплина, ориентированная на получение формы, размеров, положения и прочих характеристик объектов по их фотоизображениям, имеет давнюю историю, начинающуюся одновременно с развитием фотографии.

Суть метода сводится к использованию способов и приемов различных дисциплин, в основном оптики и проективной геометрии. Пространственные координаты, соотносящиеся с объектом, определяются через сопоставление двух или более фотографий объекта, снятых при разных углах и положениях, разностях перспективы. На изображениях отыскиваются общие точки, после чего луч зрения проводится от местоположения фотоаппарата до точки на объекте. Пересечение этих лучей, таким образом, определяет расположение точки в пространстве. Существуют и более сложные алгоритмы, при которых используется информация об объекте, известная заранее: в качестве примера можно отметить, что известная симметрия составляющих элементов объекта измерений в определенных случаях позволяет реконструировать координаты точек вообще по одному фотоснимку.

Технологии современности, в частности переход от аналоговой фотосъемки к цифровой вкупе с развитием систем автоматической обработки данных и использованием БПЛА для получения набора исходных фотоданных, позволили перейти на качественно новый уровень использования методики фотограмметрии. Применение специализированного программного обеспечения для обработки данных и трансформации серии фотографий в готовую цифровую модель местности (ЦММ) не требует специализированных глубоких знаний из таких сфер, как оптика и пространственная геометрия, значительно снижает порог вхождения для применения метода в практической исследовательской работе.

### Результаты

Что касается практического опыта применения методики фотограмметрии с использованием данных фотосъемки при помощи БПЛА, нами были проведены экспериментальные апробации в ходе полевых археологических работ, связанных с исследованием археологического комплекса поселения Йоркутинское-3, которое состоялось летом 2022 г. [4].

В соответствии с регламентом археологических исследований при помощи лазерного цифрового тахеометра Trimble M3 DR5 был снят топографический план памятника и вмещающего его рельефа по классической для археологических исследований методике [5, 6], всего для составления плана было проведено 101 измерение (рис. 1 – 1).

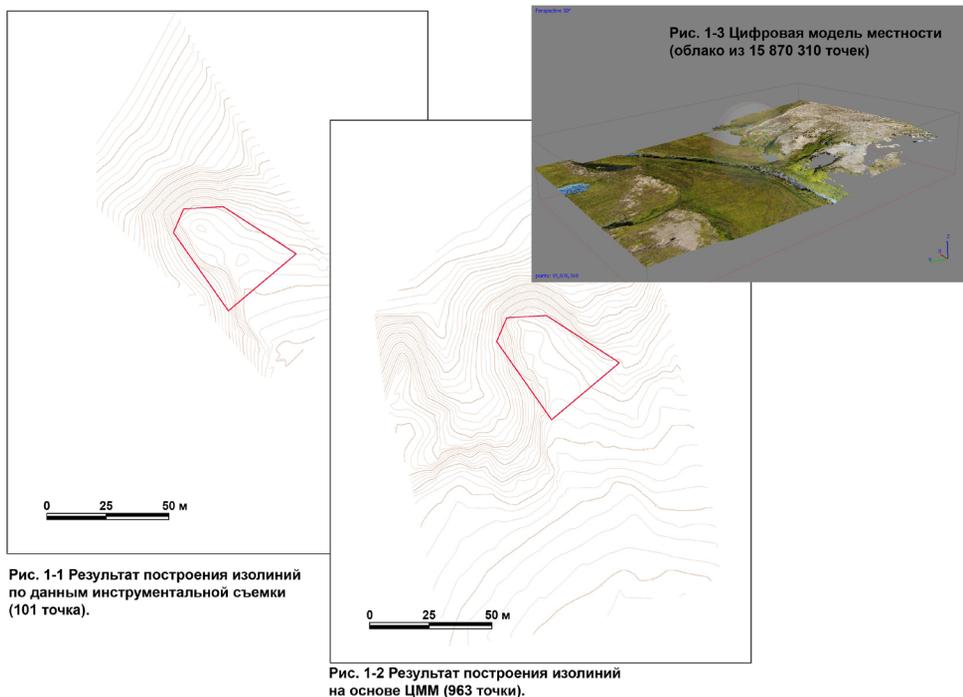


Рис. 1. Результаты топографической съемки рельефа археологического памятника

Также при помощи БПЛА DJI Mavic 2 была проведена аэрофотосъемка местности, в результате которой была получена серия из 64 снимков местности. Высота съемки составила 14–18 метров от уровня верхней площадки мыса, на которой располагается археологический памятник. Важно отметить, что для повышения качества конечного результата измерений снимки делались со значительным, до 50%, перекрытием. Также для повышения результативности для каждого снимка в автоматическом

режиме фиксировались такие показатели, как высота съемки, географическое положение камеры БПЛА в формате WGS-84. По завершении работ в камеральных условиях серия снимков обрабатывалась при помощи пакета программного обеспечения Agisoft Photoscan, успешно применяемого для решения различного круга задач археологии как зарубежными [7, 8] так и отечественными исследователями [9, 10]. Механизм работы программного обеспечения включал в себя набор последовательных операций: выравнивание фотографий и поиск парных пересечений на снимках, построение разреженного облака точек, основанное на вычислении совпадающих точек на снимках, построение плотного облака точек с учетом предыдущих вычислений, построение модели по облаку точек методом триангуляции, построение основанной на совмещении снимков текстуры. Стоит отметить, что на данном этапе цифровая модель местности имеет пробелы в виде двух участков, однако для решения вопросов, связанных с построением топографического плана, это не является непреодолимым препятствием. В частности, подобная проблема может быть решена на следующем этапе работы (обработка данных в специализированном топографическом ПО) при помощи методов автоматической интерполяции.

Результатом обработки фото при помощи ПО Agisoft Photoscan стало облако из 15 800 000 точек, передающее пространственную информацию, описывающую рельеф местности, вмещающей археологический памятник поселение Йоркутинское-3. Общая площадь построенной цифровой модели местности составила 117 600 м<sup>2</sup> (прямоугольник со сторонами 280 и 420 м), однако качество модели, в первую очередь значения высот для периферийной части цифровой модели рельефа, стоит признать невысоким. Для построения топографического плана, передающего значения высот с допустимой погрешностью, мы сократили участок модели до площади, размеры которой составили 38 400 м<sup>2</sup> (прямоугольник со сторонами 120 и 240 м), облако, описывающее высоты модели местности в этих границах, состоит из 9 670 282 точек (рис. 1 – 3). Полученный результат был экспортирован в виде набора текстовых данных о координатах вершин в формате хуз, после чего обработка данных велась при помощи специализированного инженерно-топографического ПО «IndorCAD Топо 2020», полученный результат при меньших затратах времени на съемку описывает топографическую ситуацию подробнее, чем при использовании тахеометра.

Для установки системы абсолютных высот топографического плана в качестве отсчетной высоты был выбран урез воды р. Йоркутаяха, в результате чего значения высотных отметок были скорректированы. Важно отметить, что в целом методику полевой съемки следует скорректировать, расположив до начала съемки на местности маркерные точки, хорошо

различимые на фото, а высотные отметки маркерных точек зафиксировать в полевом журнале. Особую важность подобная работа принимает при работе на участках местности, удаленных от водоемов, не попадающих в зону фотосъемки. Помимо этого, в процессе построения изолиний топографического плана оказалось, что частота расположения высотных отметок излишне высока, для чего в автоматическом режиме количество высотных отметок было значительно сокращено – до 963 точек. Дальнейшая работа по обработке данных фактически не имела отличий от обработки данных, полученных в ходе традиционной съемки при помощи тахеометра. Стоит отметить, что работа по составлению абрисов объектов, расположенных на местности, а также абрисов зон растительности и почв при подготовке чертежей в камеральных условиях в значительной степени упрощается и ускоряется при обращении к цифровой модели местности с наложенной растровой разверткой.

### *Выводы*

Таким образом, к плюсам использования БПЛА для решения задач по фиксации топографии рельефа археологических памятников можно отнести скорость съемки исходного набора данных, относительную простоту работы с техникой, высокую точность фиксации, а также то, что при построении цифровой модели местности, помимо исходного «каркаса», существует возможность создания в автоматическом режиме достоверной фоторазвертки, на которой в высоком разрешении различимы характерные особенности рельефа, отдельные объекты «in situ».

К минусам использования стоит отнести ограничения метода. Так, для использования фотограмметрии не подходят участки, покрытые кустарниками и древесной растительностью, в первую очередь, густозалеженные участки, в силу создаваемых искажений высотных отметок, что следует учитывать при планировании работ и оценке целесообразности применения метода на стадии изучения района исследования. Стоит отметить, что применение метода в условиях Ямальской тундры видится наиболее перспективным. Вместе с тем можно предположить, что неэффективно использование метода при фиксации объектов, выраженных в рельефе, но скрытых под травянистой растительностью, мхами, кустарниками (например, при попытке фиксации впадин на археологических могильниках). При планировании исследований также стоит учитывать, что использование БПЛА при плохих погодных условиях – ветреной и/или дождливой погоде – может значительно затруднить съемку. Также стоит отметить, что использование описанного выше метода способно решить задачи топографической съемки рельефа археологического памятника и окружающего интерьера, однако метод не способен

заменить работы, сопровождающие археологические исследования в обязательном порядке – фиксацию границ раскопов и шурфов, съемку высотных значений при разборке культурного слоя, фиксацию встреченных в культурных слоях артефактов и объектов, т.е. квадрокоптер не заменяет тахеометр (нивелир, теодолит), лишь дополняя его и упрощая решение отдельных задач.

В заключение отметим, что наиболее рациональным способом практического применения методов фотограмметрии при построении ЦММ на основе снимков, сделанных беспилотными летательными аппаратами, видится комплексный подход, при котором описанный метод сочетается с классической инструментальной съемкой. Выраженные в рельефе остатки жилищ, укреплений, могильных впадин, местоположения заложенных шурфов, раскопов, зачисток, границы археологического комплекса и отдельные характерные поворотные точки – все это, несомненно, требует инструментальной съемки. Для построения рельефа на открытых участках местности БПЛА может стать удобным и эффективным вспомогательным инструментом.

### *Список источников*

1. Быков А.Л. и др. Геодезическое обеспечение археологических работ с применением БПЛА и методов стереофотограмметрии //Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2014. – Т. 4. – № 1. – С. 41-45.
2. Крупочкин Е.П., Папин Д.В. О перспективах использования беспилотной съемки в археологических исследованиях //Теория и практика археологических исследований. – 2018. – № 4 (24). – С. 71-84.
3. Nikolakopoulos K. G. et al. UAV vs classical aerial photogrammetry for archaeological studies //Journal of Archaeological Science: Reports. – 2017. – Т. 14. – С. 758-773.
4. Тупахина О.С., Тупахин Д.С. Археологический комплекс поселение Йоркутинское-3: результаты исследований //Археология Арктики. Вып. 8. 2023 (в печати).
5. Зайцева О.В. и др. Тахеометрическая съемка в археологических исследованиях: учебно-методическое пособие. – Новосибирск, 2010.
6. Rick J. W. Total stations in archaeology//SAA bulletin. – 1996. – Т. 14. – № 4. – С. 31-34.
7. Thomas H., Kennedy M. A. A new methodology for accurate digital planning of archaeological sites without the aid of surveying equipment //Journal of Archaeological Science: Reports. – 2016. – Т. 10. – С. 887-892.
8. Douglass M., Lin S., Chodoronek M. The application of 3D photogrammetry for in-field documentation of archaeological features //Advances in Archaeological Practice. – 2015. – Т. 3. – № 2. – PP. 136-152.

9. Зайцева Ольга Викторовна «3D революция» в археологической фиксации в российской перспективе // Сибирские исторические исследования. – 2014. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/3d-revolyuksiya-v-arheologicheskoy-fiksatsii-v-rossiyskoy-perspektive> (дата обращения: 13.11.2023).
10. Файзов Д.С. Опыт создания высоко- и низкополигональных 3d-моделей в рамках археологических исследований в Калининградской области // Информационный бюллетень ассоциации «История и компьютер». – 2015. – № 44. – С. 20-23.

---

### *Сведения об авторе*

---

**Тупахин Даниил Сергеевич**, 1988 г.р., окончил исторический факультет Национального Исследовательского Томского государственного университета, с 2013 г. – лаборант, с 2014-го по н.в. – младший научный сотрудник сектора истории и археологии ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Сфера научных интересов: древняя история субарктической зоны, каменные индустрии древности, археология.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 13, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.

**ГЕОЭКОЛОГИЯ**

---

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 84-99.  
Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 84-99.

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья  
УДК 556.555.4  
doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМА ОБСКОЙ ГУБЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА DELFT3D: СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

*Александр Николаевич Семчуков<sup>1</sup>, Владимир Викторович Кириллов<sup>2</sup>*

<sup>1, 2</sup>*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

<sup>1</sup>*ss16011973@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2876-5713>*

<sup>2</sup>*heller53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9626-7153>*

**Аннотация.** С помощью численной модели на основе программного комплекса Delft3D выполнен расчет термохалинного и ледового режимов Обской губы и прилегающего шельфового района Карского моря за 2010 г. Результаты расчета сопоставлены с данными экспедиционных исследований, спутниковыми и литературными данными. На основе анализа результатов определены основные направления совершенствования модели.  
**Ключевые слова:** Обская губа, математическое моделирование, температура, соленость, лед.

**Цитирование:** Семчуков А.Н., Кириллов В.В. Расчет термохалинного режима Обской губы // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 84–99. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006.

Original article

## NUMERICAL SIMULATION OF THERMOHALINE CONDITIONS OF THE GULF OF OB BY THE DELFT3D SOFTWARE PACKAGE: COMPARISON OF SIMULATION RESULTS WITH FIELD DATA

*Aleksandr N. Semchukov<sup>1</sup>, Vladimir V. Kirillov<sup>2</sup>*

*<sup>1,2</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

*<sup>1</sup>ss16011973@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2876-5713>*

*<sup>2</sup>heller53@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9626-7153>*

**Abstract.** Using a numerical model based on the Delft3D software package, the thermohaline and ice conditions of Gulf of Ob and the adjacent shelf area of the Kara Sea were simulated for 2010. The simulation results were compared with expeditionary research data, satellite and literary data. Based on the analysis of the results, the main directions for improving the model were determined.

**Keywords:** Gulf of Ob, numerical simulation, temperature, salinity, ice.

**Citation:** Semchukov A.N., Kirillov V.V. Simulation of thermohaline conditions of the Gulf of Ob // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4 (121). P. 84–99. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.006.

### *Введение*

Температура и соленость являются важными факторами, влияющими на жизнедеятельность водной экосистемы, качество воды и рыбопродуктивность водоема. В эстуариях не только температура, но и соленость подвержены большой пространственной и временной изменчивости и в значительной степени определяется дальностью проникновения морских вод. В последнее время район Обской губы интенсивно осваивается в хозяйственном отношении. Поэтому, в связи с малым развитием сети гидрометеорологических наблюдений и необходимостью прогноза изменения термохалинного режима из-за антропогенного воздействия и изменения климата большое значение приобретает их математическое моделирование. Расчет изменения солености и температуры воды необходимо вести одновременно с расчетом течений и ледового режима.

И то, и другое имеет самостоятельное значение, так как определяет условия навигации.

Данная статья посвящена апробации трехмерной математической модели течений, термохалинного и ледового режимов Обской губы и прилегающего шельфового района Карского моря на основе программного комплекса Delft3D. Результаты расчетов температуры и солёности воды в годовом цикле были сопоставлены с экспедиционными данными, а результаты расчета толщины льда – со спутниковыми и литературными данными.

### *Математическая модель и подготовка входных данных*

В основе программного комплекса Delft3D лежит классическая трехмерная модель течений и термохалинного режима относительно неглубокого водоема, т.е. уравнения Рейнольдса в гидростатическом приближении и приближении Буссинеска, дополненные моделями турбулентного обмена, уравнениями переноса примеси и тепла, уравнением состояния и соответствующими граничными условиями [1]. Программный комплекс позволяет учитывать осушение и затопление дна (ячеек расчетной сетки) при изменении уровня воды.

В расчетах использовался вариант программного комплекса, дополненный модулем, описывающим изменение толщины снежного и ледового покрова [2]. Однако ледотермический блок, описывающий процессы нарастания и таяния льда, а также таяния снега на нем, был полностью переработан. Также как и в оригинале, предполагается квазистационарное распределение температуры по толще снежно-ледового покрова, что вызывает необходимость нахождения равновесной температуры его верхней поверхности исходя из непрерывности теплового потока на ней. Однако в оригинале при решении соответствующего уравнения температура считалась неизвестной величиной только в радиационном компоненте теплового потока от снежно-ледового покрова в атмосферу, а во всех других компонентах использовалось ее значение на предыдущем временном шаге. Предварительные расчеты показали, что это приводит к нефизическому изменению толщины льда при резком изменении погоды. Поэтому в переработанном блоке, согласно методике [3, 4], температура считается неизвестной во всех компонентах теплового потока. Ледодинамический блок, описывающий механическую трансформацию снежно-ледового покрова, в расчете не использовался, но в отличие от подобной работы [5] в ледотермическом блоке учитывалось наличие снега на льду.

Ледотермический блок был откалиброван для участка Тазовской губы, расположенного около устья р. Таз и Пур (пос. Находка) [6].

Расчет велся в т.н.  $\sigma$ -координатах, когда во всех точках водоем разби-

вается на одинаковое (в данном случае 20) число слоев одинаковой относительной толщины. Вертикальный турбулентный обмен рассчитывался с помощью алгебраической модели, а горизонтальный обмен описывался с использованием постоянных коэффициентов турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности.

Расчетная область включает в себя Обскую, Тазовскую и Гыданскую губы, Енисейский залив, а также мелководную шельфовую часть Карского моря, ограниченную меридианами  $68.5^\circ$  в.д.,  $81.5^\circ$  в.д. и параллелями  $72.5^\circ$  с.ш.,  $74.5^\circ$  с.ш. Для этой области построена равномерная сферическая конечно-разностная сетка (до 129 узлов по долготе и до 210 – по широте соответственно, что соответствует размеру ячейки порядка 4 км). Расчет велся с 1 июля 2009 г. по 31 декабря 2010 г.

Подготовка входных данных была подробно описана в [6]. В отличие [5] в числе граничных в расчетах учитывалось влияние не только р. Оби, Таза и Пура, но и других притоков расчетной области: р. Енисея, Надыма, Мессояхи, Гыды и Юрибея. При этом задавались не климатические значения расхода и температуры воды этих рек, а их значения конкретно для расчетного периода, либо непосредственно полученные из гидрологических ежегодников [7–10], либо откорректированные или оцененные по косвенным данным.

На морской границе задавался постоянный уровень воды и климатическое пространственно-временное распределение температуры и солености для нескольких уровней глубины [11]. Аналогично задавалось и начальное состояние расчетной области.

Для определения взаимодействия с атмосферой использовались данные 19 береговых и островных метеостанций [12], которые интерполировались методом триангуляции.

### *Результаты расчета температуры воды и солености*

Расчетные величины температуры воды и солености были сопоставлены с данными двух комплексных экспедиций, выполненных ФГУП «ВНИРО» и ИО РАН летом и осенью 2010 г. [13]. Район экспедиций включал в себя среднюю и северную части Обской губы от створа м. Каменный – м. Парусный до широты м. Дровяной и не включал Тазовскую губу. Летняя экспедиция имела место вскоре после очищения губы ото льда в период высоких вод с 29 июля по 17 августа, а осенняя – перед ледоставом, в период низких вод с 18 сентября по 7 октября. Всего было задействовано 120 комплексных станций. Даты и время конкретных измерений в статье [13] не приведены, но, судя по номерам створов, можно предположить, что летом измерения проводились последовательно с юга на север, а осенью наоборот.

### Летняя экспедиция

Согласно [13], в целом во время летней экспедиции Обские воды, имевшие на выходе в губу температуру 14–15 °С, к м. Каменному охлаждались до 11 °С, а после слияния с Тазовскими водами быстро охлаждались к границе «речной» части (71° 20' с.ш. или примерно широта м. Хонарасаля) до 3–4 °С.

В расчетах для этого периода задавалась температура вод р. Оби на входе в Обскую губу в пределах 12.1–16.9 °С. Возможно, она была несколько завышена, так как за неимением других достоверных данных использовались значения температуры для гидрологического поста Салехард [7, 8] (для расположенного ниже по течению поста Аксарка указывалась еще более высокая температура). По этой же причине расчетная температура в Обской губе тоже может быть несколько завышена.

Днем 29 июля, как показано на рис. 1, расчетная поверхностная температура у м. Каменный составляла от 10.5 до 13 °С (выше – посередине, меньше – у берегов), а у м. Хонарасаля – от 3 до 5 °С (выше – у берегов,

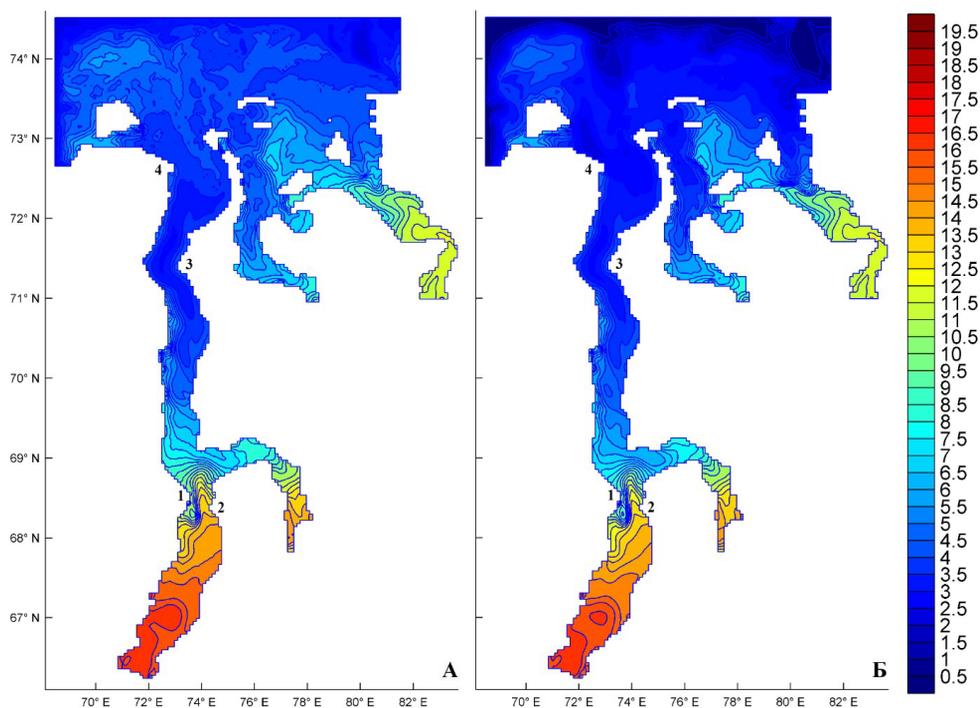


Рис. 1. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) температура воды в полдень 29 июля, °С

Примечание: 1 – м. Каменный, 2 – м. Парусный, 3 – м. Хонарасаля, 4 – м. Дровяной

меньше – посередине). К 17 августа фронт теплой воды в районе устья Тазовской губы незначительно продвигается на север, и поверхностная температура у м. Хонарасаля повышается до 5–6 °С за счет прогрева и оттеснения холодных вод к северу.

Описанный в [13] отжим Обских вод более холодными водами Тазовской губы к левому берегу почти не наблюдается. Возможно, это связано с недооценкой стока впадающих в Тазовскую губу рек (Таз, Пур, Мессо-яха). Для р. Пур расходы были известны только для гидрологического поста Уренгой, находящегося на значительном удалении от устья, а для других рек – неизвестны совсем. Поэтому расходы этих рек у устья пришлось оценивать косвенным образом. Впрочем, на приведенных в [13] рисунках этот отжим слабо выражен.

Аналогично [13], в период летней экспедиции результаты расчетов показывают в «речной» части Обской губы выраженное струйное течение с высоким вертикальным перемешиванием (см. рис. 1) и ограниченным поперечным водообменом. Также как и в [13] в средней части губы вдоль западного, более пологого берега температура воды существенно выше, чем у восточного, где проходит большая часть Обского стока. Обратная картина наблюдается в южной части, которая не была охвачена экспедицией: температура в струе теплых Обских вод выше, чем у берегов.

Термическая картина в «морской» части губы целиком определяется нюансами контакта соленых и пресных вод [13]. Так же, как и в [13], по расчетам соленые воды в период летней экспедиции вторгаются в Обскую губу примерно до широты 72° с.ш. (см. рис. 2). Соленые воды следуют по донному желобу в направлении с северо-запада на юго-восток, то есть, можно, как и в [13], сказать, что «заток соленых вод вдоль восточного берега заметно активнее, что отмечается на всем протяжении зоны контакта соленых и пресных вод».

Согласно [13], на северо-западе губы, около мыса Дровяной, на поверхности наблюдается небольшая зона повышенной минерализации (до 18 ‰), а в остальном соленость над галоклином составляет порядка 1.5 ‰. В расчетах же за счет избыточного вертикального перемешивания соленость опресненного слоя выше (до 9 ‰, в среднем порядка 4 ‰), но в придонном слое соленый фронт продвигается меньше (например, изогалина 10 ‰ доходит на юге до 72° с.ш. – 72°15′ с.ш. против 72°30′ с.ш. в расчетах). Описанная в [13] повышенная соленость в узкой прибрежной полосе так же заметна (у восточного берега), но этот эффект не так выражен. Он наблюдается главным образом в начале описываемого периода, когда приток пресной воды ближе к середине губы наиболее высок. Возможно, более точные результаты по дальности проникновения морских вод могут быть получены при учете приливов, что в приведенных расчетах не делалось.

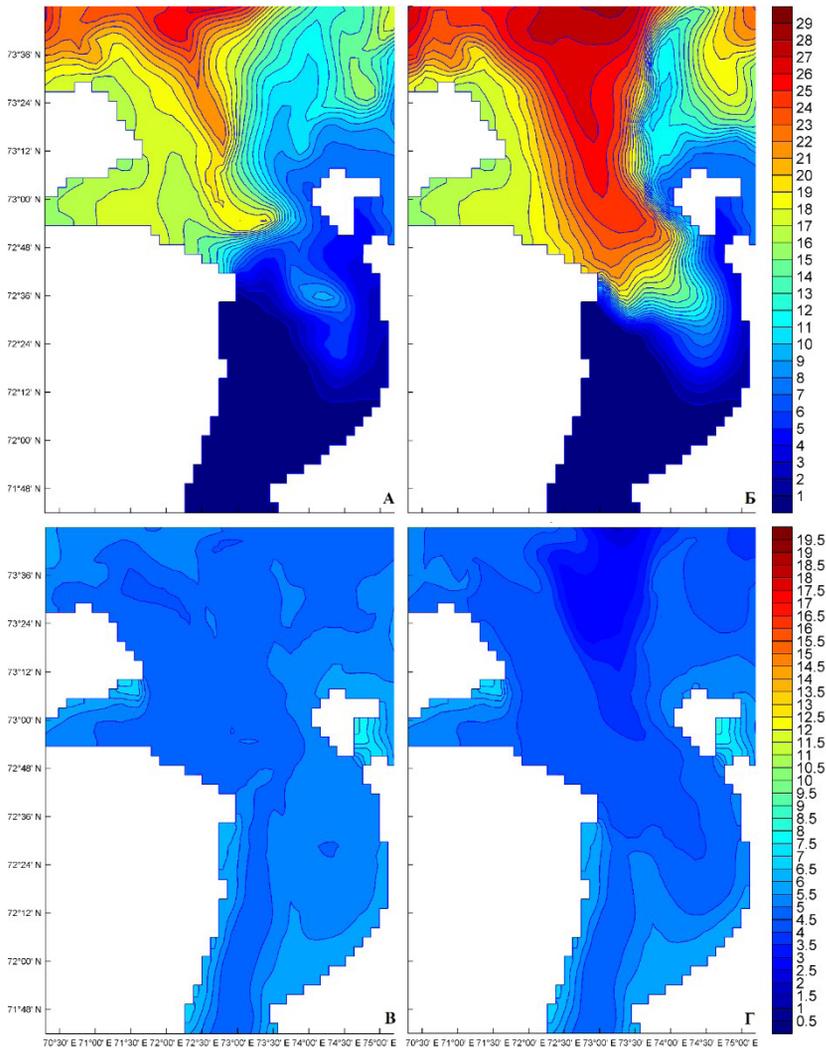


Рис. 2. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) соленость, ‰, а также поверхностная (В) и придонная (Г) температура воды, °С, в северной части Обской губы в полночь 14 августа

Избыточное вертикальное перемешивание может быть отчасти связано с использованием при расчетах т.н.  $\sigma$ -координат, которые хорошо работают при больших перепадах уровня воды, но порождают искусственно вертикальный обмен.

Температуры в области галоклина также несколько завышены, что может быть вызвано, в частности, тем, что расчетный алгоритм программного комплекса Delft3D в базовом варианте не работает при отрицательной температуре воды и, следовательно, нуждается в модификации. Поэтому приходилось искусственно завышать температуру воды на морских гра-

ницах расчетной области и температуре замерзания. Также может оказать влияние и то, что в этих расчетах для экономии времени был отключен ледодинамический блок, описывающий деформацию ледового покрова и его механическое разрушение. Возможно, полынья может быть ответственной за дополнительное выхолаживание моря.

Расчетная температура над галоклином за период летней экспедиции меняется от 3.5–4 °С до 5–6 °С против порядка 4–4.5 °С согласно приведенным в [13] рисункам. Разница в придонной температуре еще выше – по расчетам от 2.5–3.5 °С в начале экспедиции до 4–6 °С в ее конце против 0–6 °С (в среднем порядка 1–1.5 °С). Тут еще нужно учитывать, что придонный слой включает районы мелководья, где он расположен недалеко от поверхности. Кроме того, стоит отметить, что во время летней экспедиции на район галоклина приходилось только 2 полных створа, то есть приведенные в [13] изотермы и изогалины в значительной степени условные.

### *Осенняя экспедиция*

В [13] утверждается, что в период осенней съемки вследствие уменьшившегося в 2 раза речного стока на первый план вышли атмосферные факторы. В «речной» части губы отмечается очень высокая степень перемешанности всей толщи воды, температура колеблется около отметки 3.5 °С. Исчезла струйность потока, пятна относительно высоких температур лишь отмечают направление оси Обского потока. Акватория губы разбивается на небольшие плотностные и температурные ячейки, что является следствием высокой динамики происходящих процессов, вызванных сильнейшими штормами и связанными с ними сгонами-нагонами. Все это приводит к постоянным изменениям вектора действующих потоков.

В расчетах также имеет место почти полная вертикальная перемешанность в «речной» части губы. Однако пространственная изменчивость метеоданных задавалась довольно грубо, путем триангуляции данных на небольшом количестве метеостанций. Временное же разрешение (выдачи результатов расчета) составляло одни сутки. Возможно поэтому, а также из-за грубой сетки расчетное распределение температуры носит более упорядоченный характер (см. рис. 3). В средней части губы у восточного берега, а также у устья Оби наблюдаются пятна тепла. Но на севере, а также на мелководном баре в южной части губы, не затронутой экспедиционными исследованиями, температура была гораздо ниже. Особенно низкой она была на береговых отмелях. В начале экспедиционного периода, 18 сентября, расчетная температура менялась в пределах 2.5–7 °С (по всей видимости, измерения в это время проводились в северной части губы). К концу экспедиционного периода, 7 октября, такая картина в целом сохраняется, но тепловое пятно в средней части губы смещается и,

действительно, теряет свою форму, почти распадаясь на отдельные пятна. Расчетная температура при этом меняется в пределах от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $4\text{--}4.5^{\circ}\text{C}$ . На большей части исследованного экспедицией «речного» участка губы от м. Каменный до м. Хонарасаля температура была действительно порядка  $3.5^{\circ}\text{C}$ .

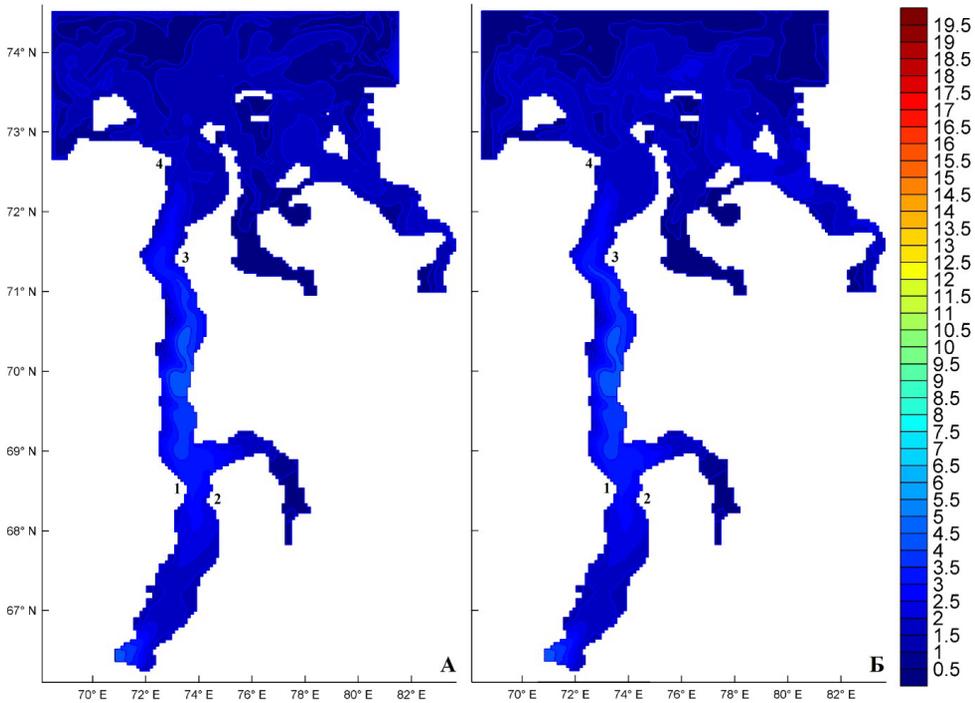


Рис. 3. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) температура воды в полдень 7 октября,  $^{\circ}\text{C}$

Примечание: 1 – м. Каменный, 2 – м. Парусный, 3 – м. Хонарасаля, 4 – м. Дровяной

На приведенных в [13] рисунках видно, что наиболее теплые пятна с температурой порядка  $4^{\circ}\text{C}$  действительно тяготеют к глубоководным районам около восточного берега в средней части губы.

Описанного в [13] отжима вод Тазовской губы к ее левому берегу ветровым нагоном в результатах расчетов в явном виде обнаружить также не удалось.

Расчетная температура в северной части губы в период второй экспедиции меняется примерно от  $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$  17 сентября до  $1.5\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$  7 октября против примерно  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$  по рисункам из [13].

Согласно [13], к осени зона контакта соленых и пресных вод в северной части губы преодолела отметку  $72^{\circ}$  с.ш. и сместилась в южном направлении на  $30\text{--}40$  км. Речной сток севернее  $71^{\circ}50'$  с.ш. на фоне уменьшаю-

щейся водности все более тяготеет к левому берегу и отжимается солеными водами как со дна, так и с восточной стороны, где у поверхности по оси 73°20' в.д. – 73°30' в.д. обозначился фронт солености (в тексте 72°20' в.д. – 72°30' в.д., но это, очевидно, опечатка), а восточнее, вне зоны активного влияния речного стока, сформировалась промежуточная водная масса, для которой характерна большая однородность верхнего перемешанного слоя.

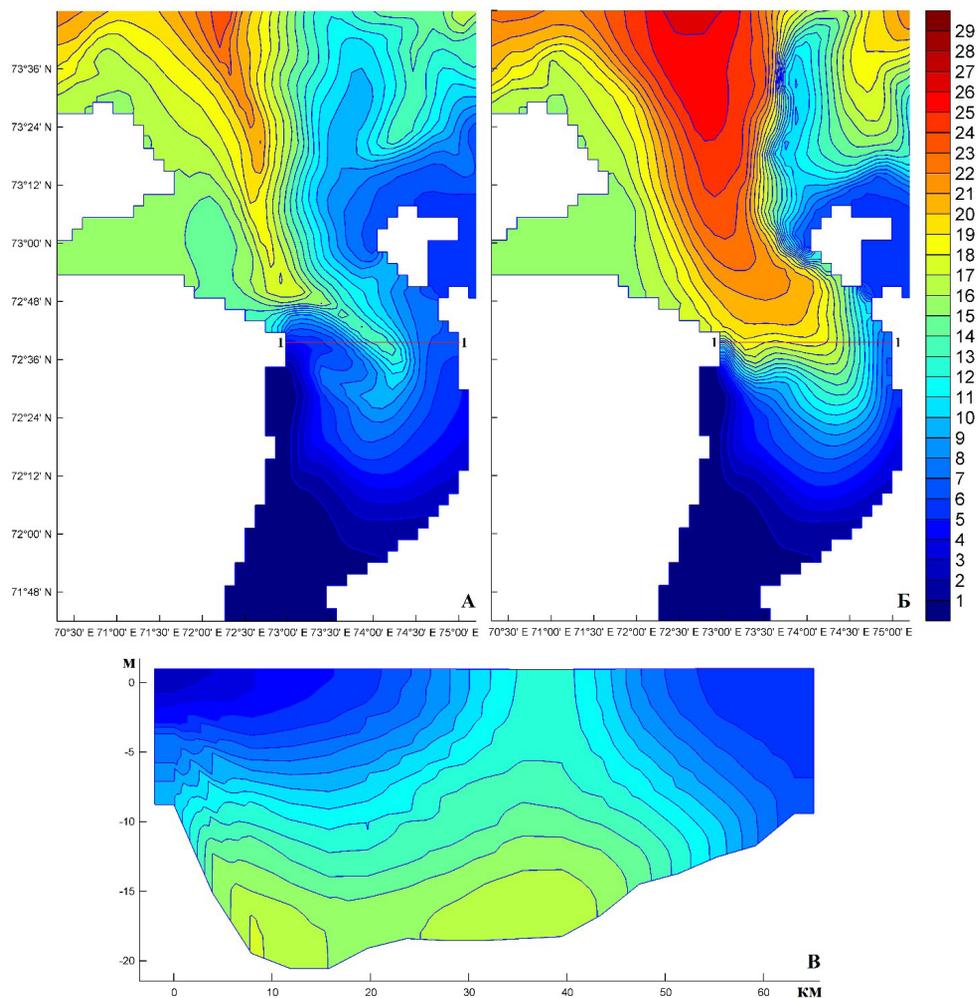


Рис. 4. Расчетная поверхностная (А) и придонная (Б) соленость в северной части Обской губы, а также соленость на разрезе 1–1 (м. Дровяной, створ 17) в полдень 2 октября, ‰

В расчетах осенью также наблюдается подобие упомянутого солевого фронта примерно на том же меридиане (см. рис. 4). Соленые воды так же

продвигаются на юг больше, чем летом, но все же меньше, чем по данным наблюдений. Например, в придонном слое изогалина 10 ‰ в расчетах продвигается на юг до 72°23' с.ш., а согласно рисункам из [13] – примерно до 72°07' с.ш., изогалина 1 ‰ – до 71°54' с.ш. против примерно 71°37' с.ш. Кроме того, в поверхностном слое зона повышенной минерализации на востоке не доходит до берега, возможно из-за неучета приливов (определенную роль мог сыграть также завышенный сток Енисея). Поэтому в расчетах наблюдается течение не только вдоль западного, но и вдоль восточного берега.

На рис. 4. можно видеть, что, по расчетам, как и в [13], на створе 19 (72°15' с.ш.) ширина упомянутого потока трансформированных Обских вод у западного берега порядка 30 км и он хорошо перемешан по вертикали, а к створу 17 (м. Дровяной, 72°40' с.ш.) он уже оторвался от дна, имеет высоту порядка 5 м и значительно меньшую ширину. Здесь, как и в [13], условной границей этого потока считается изогалина 6 ‰. Далее на восток и вплоть до восточной прибрежной струи верхний перемешанный слой однороден.

Расчетная соленость вне зон активного поверхностного стока на створе м. Дровяной 2 октября (рис. 4) составила около 17–19 ‰ у дна и до 13 ‰ у поверхности. В [13] указываются величины в 20–25 ‰ и 8–9 ‰. Предположительно съемка была сделана в близкую дату.

### *Результаты расчета толщины льда*

Согласно расчету, лед появляется в середине октября 2010 г. около берегов в южной части Обской, Тазовской и Гыданской губ и Енисейского залива, а также около островов на границе с морем. Затем прибрежные ледовые поля в южной части заливов смыкаются и распространяются на север. Ближе к концу месяца ледовые поля появляются у берегов и в остальной части Обской губы, а затем они также смыкаются. Но устье Оби какое-то время остается свободным ото льда. Оно замерзает последним, в начале ноября.

Наибольшая расчетная толщина льда (1–1.5 м) достигается в начале мая (см. рис. 5). Наибольшее значение (1.5 м) достигается в средней части Тазовской губы. Непосредственно в Обской губе наибольшая расчетная толщина льда (1.3–1.4 м) имеет место примерно между Новым портом и Тазовской губой, а также на мелководьях у левого берега от Тазовской губы до м. Поруй (южнее пос. Сабетта). А наименьшая (1 – 1.1 м) – на юге и в глубоководном районе в северной части Обской губы.

В первой–второй декадах мая толщина льда в районах впадения притоков начинает уменьшаться, но в некоторых других районах ее рост продолжается до третьей декады, после чего уменьшение становится повсеместным. В первой декаде июня ото льда освобождается устье р. Оби,

в третьей – р. Таза, Пура и Енисея. В первой декаде июля ото льда освобождается Енисейский залив и устье р. Гыды. К концу этой декады, согласно расчету, ледовый покров сохраняется только на шельфе в районе Гыданской губы, около о. Белый, а также на севере Обской губы между м. Хонарасалья (севернее пос. Сабетта) и м. Дровяной и у ее левого берега от м. Хонорасалья до м. Хасрё (около пос. Сеяха). В начале второй декады июля Обь-Тазовская устьевая область полностью освобождается ото льда.

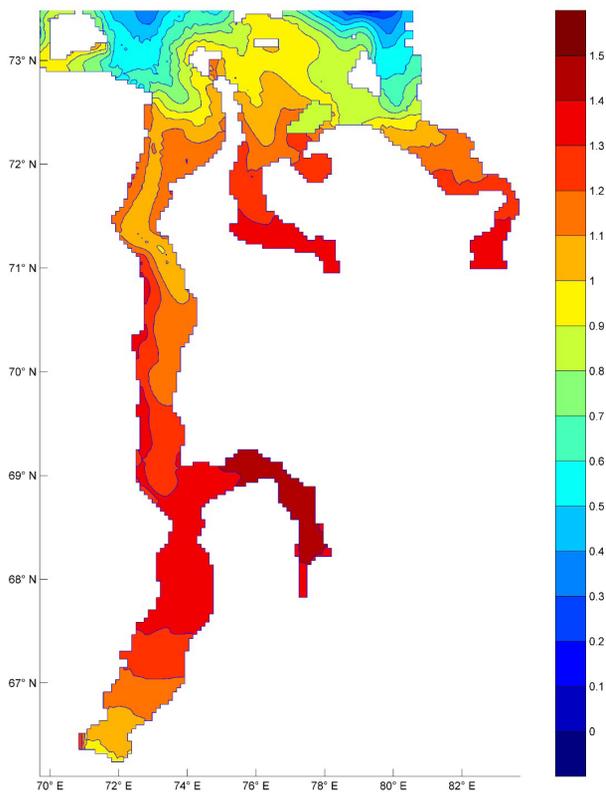


Рис. 5. Расчетная толщина льда, м, в Обь-Тазовской устьевой области на 10 мая 2010 г.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными наблюдений. По данным ИСЗ Terra/Aqua MODIS, ледостав в 2009 г. в южной и центральной частях Обской губы начинается 20 октября, а ледотаяние в 2010 г. заканчивается 13 июля [14]. В среднем (1947–2010 гг.) толщина льда в Обской губе на конец апреля достигает 1.4–1.7 м [15].

Спутниковые данные по толщине льда в указанном районе за зиму 2009–2010 гг. найти не удалось, а расчет за следующую зиму был неполным и завершился с концом календарного года. Поэтому было выполнено сравнение результатов расчета с комбинированными спутниковыми

данными CryoSat-2&SMOS [16] за середину декабря 2010 г. По результатам расчета, толщина льда в южной части губы составила 0,2–0,4 м, в центральной (от м. Каменный до м. Хонорасаля) и северной – 0,3–0,6 м. А по спутниковым данным, соответственно, 0,1–0,2 м, 0,1–0,6 м и 0,5–0,9 м. То есть, по сравнению со спутниковыми данными, расчет дает большую толщину льда в южной и меньшую в северной части губы. Это может быть вызвано, например, переносом молодого льда с юга на север, что в описываемом расчете не учитывалось. Кроме того, калибровка ледового блока модели выполнялась по максимальной толщине льда, то есть в начале зимы расхождение с натурными данными должно быть больше.

### *Заключение*

Модель адекватно описывает термохалинный и ледовый режим в «речной» части Обской губы, но для более точного описания процессов взаимодействия речных и морских вод желательно учитывать дополнительные факторы, такие как приливы, зависимость температуры замерзания от солености и более детально описывать процессы вертикального перемешивания. Также возможно, что более точная оценка распределения толщины льда по акватории может быть получена при учете деформации ледового поля под воздействием внешних механических нагрузок.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Исследование разнообразия и структурно-функциональной организации водных экосистем для сохранения и рационального использования водных и биологических ресурсов Западной Сибири») и НИИР «Комплексные научные исследования Обской губы в рамках реализации проекта «Экологическая безопасность Обь-Иртышского речного бассейна» по договору с Некоммерческим Партнерством «Российский Центр освоения Арктики».

### *Acknowledgments*

The work was carried out within the framework of the state assignment of IWEP SB RAS (project “Study of the diversity and structural and functional organization of aquatic ecosystems for the conservation and rational use of water and biological resources of Western Siberia”) and the research project “Comprehensive scientific research of the Gulf of Ob within the framework of the project “Ecological safety of the Ob-Irtysh River Basin” under an agreement with the Non-Commercial Partnership «Russian Center for Arctic Development».

**Список источников**

1. Delft3D-FLOW. User Manual. Version 4.05. Delft: Deltares, 2023. 701 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW\\_User\\_Manual.pdf](https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf) (дата обращения 17.05.2023).
2. Goede E.D. de, Graaff R.F. de, Wagner T., Sheets B. Modelling of ice growth and transport on a regional scale, with application to Fountain Lake // Proceedings of the 33rd International conference on offshore mechanics and Arctic engineering. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.658.6719&rep=rep1&type=pdf>. (дата обращения 14.09.2023).
3. Rayan P.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D. Surface heat loss from cooling ponds. // Water resources research. 1974. Vol. 10. № 5. P. 930–938.
4. Wake A., Rumer R.R. Modeling ice regime of Lake Erie. // Journal of the Hydraulics Division. 1979. Vol. 105. № 7. P. 827–844.
5. Чанцев В.Ю., Даньшина А.В. Расчет внутригодовой динамики гидрофизического режима Обской губы с высоким пространственным разрешением // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 55–64.
6. Семчуков А.Н., Захаров В.П. Математическое моделирование термохалинного режима Обской губы с помощью программного комплекса Delft3D: построение цифровой модели рельефа дна, подготовка входных данных и пробные расчеты // Научный вестник ЯНАО. 2019. № 2 (103). С. 52–59.
7. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2009 г. Т. 1. РФ. Вып. 10. Бассейн Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Новосибирск: Зап. Сиб. УГМС, 2010. 320 с.
8. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2010 г. Т. 1. РФ. Вып. 10. Бассейн Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Новосибирск: Зап. Сиб. УГМС, 2011. 368 с.
9. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2009 г. Т. 1. РФ. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Красноярск: Среднесибирское УГМС, 2010. 274 с.
10. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2010 г. Т. 1. РФ. Вып. 12. Бассейн

- Енисей (без бассейна Ангары) и Пясины. Ч. 1. Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища. Красноярск: Среднесибирское УГМС, 2011. 310 с.
11. LEVITUS94 [Электронный океанографический атлас]. URL: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94/index.html> (дата обращения 01.03.2019).
  12. Meteomanz.com [База метеорологических данных]. URL: <http://www.meteomanz.com> (дата обращения 01.03.2019).
  13. Лапин С.А. Гидрологические характеристики Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
  14. Тарасенко А.Д., Селюженко В.В., Сандалюк Н.В., Абрамова И.А., Демчев Д.М. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48–63.
  15. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2017. 186 с.
  16. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // The Cryosphere. 2017. Vol. 11. № 4. P. 1607–1623.

### *Сведения об авторах*

---

**Александр Николаевич Семчуков**, 1973 г.р., в 1994 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «механика и прикладная математика». С того же года работает в Новосибирском филиале Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул). Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Область научных интересов: математическое моделирование термогидродинамических и экологических процессов в водоемах и водотоках.

**Владимир Викторович Кириллов**, 1953 г.р., в 1978 г. окончил Новосибирский государственный университет по специальности «биология». С 1991 г. работает в Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул). Кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией Водной экологии. Область научных интересов: экология озер, рек и водохранилищ, речных систем и их водосборных бассейнов.

### *Участие авторов*

---

Семчуков А.Н. – подготовка входных данных, расчеты, анализ результатов, написание текста статьи.

---

Кириллов В.В. – постановка задачи, написание текста статьи, научное редактирование.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 17.09.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on September 17, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 502.5

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.007

### СТРОЕНИЕ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ И УСЛОВИЯ ГУМИФИКАЦИИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ПОЛЯРНОГО УРАЛА И ЯМАЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

*Алина Валерьевна Гузева<sup>1</sup>, Никита Эдуардович Демидов<sup>2</sup>,  
Артем Евгеньевич Лапенков<sup>3</sup>*

*<sup>1,2</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия*

*<sup>1,3</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук - Институт озероведения Российской академии наук (СПБ ФИЦ РАН – ИНОЗ РАН), Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>1</sup>olina2108@mail.ru*

*<sup>2</sup>nikdemidov@mail.ru*

*<sup>3</sup>lapa13art@gmail.com*

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках гранта РНФ № 22-27-00131

**Аннотация.** В работе впервые исследованы состав и строение, а также условия образования и роль гуминовых кислот в донных отложениях озер Полярного Урала и прилегающей части ямальской тундры. Определены физико-химические параметры водной толщи, дано описание донных отложений озер, а также с помощью современных методов спектроскопии проанализирован элементный состав и строение выделенной из отложений фракции гуминовых кислот. Показано, что полученные образцы характеризуются слабой степенью зрелости и устойчивости к окислению, присущей гумусовому веществу холодных климатических условий. В изученных озерах трансформация органического вещества происходит замедленно с преобладанием процессов минерализации, поэтому зрелое алифа-

тическое ядро гуминовых кислот практически не синтезируется, а в структуре сохраняются полисахаридные и пептидные остатки. В составе изученных образцов идентифицируются кислородсодержащие группы, обуславливающие их потенциальное взаимодействие с ионами природных вод, минеральной частью донных отложений, а также металлами-загрязнителями окружающей среды.

**Ключевые слова:** гуминовые кислоты, гумус, термокарстовые озера, Полярный Урал, оз. Большое Щучье, Арктика.

**Цитирование:** Гузева А.В., Демидов Н.Э., Лапенков А.Е. Строение гуминовых кислот и условия гумификации в донных отложениях озер Полярного Урала и ямальской тундры // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 100–119. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.007

Original paper

## STRUCTURE OF HUMIC ACIDS AND HUMIFICATION PROCESSES IN SEDIMENTS OF THE LAKES OF THE POLAR URALS AND YAMAL TUNDRA

*Alina V. Guzeva<sup>1</sup>, Nikita E. Demidov<sup>2</sup>, Artem E. Lapenkov<sup>3</sup>*

*<sup>1,2</sup>Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

*<sup>1,3</sup>St. Petersburg Federal Research Center of RAS - Institute of Limnology RAS, St. Petersburg Russia*

*<sup>1</sup>olina2108@mail.ru*

*<sup>2</sup>nikdemidov@mail.ru*

*<sup>3</sup>lapa13art@gmail.com*

**Annotation.** The work focuses on the study of elemental composition and structure, conditions of humification and geochemical role of humic acids in sediments of the lakes located within the Polar Urals and Yamal tundra. The physical and chemical parameters of water and sediments were measured. The elemental composition and structure of sediment humic acids were analyzed by high-accurate methods: CHN-analysis, <sup>13</sup>C NMR- and FTIR-spectroscopy. The results showed that the humic acids are characterized by immature structure with predominance of

aliphatic components and significant content of polysaccharide and peptide fragments. Therefore, the humification processes in the studied lakes is slowed down. Furthermore, the O-containing functional groups were identified in the macromolecules of the humic acids. These groups potentially react with ions of natural waters, mineral components of the sediments and toxic metals.

**Keywords:** humic acids, humus, thermokarst lakes, Polar Urals, Lake Bolshoe Shchuchye, Arctic.

**Citation:** Guzeva A.V., Demidov N.E., Lapenkov A.E. Structure of humic acids and humification processes in sediments of the lakes of the Polar Urals and Yamal tundra // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). № 4. P. 100–119. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.007.

**Funding.** The research is supported by the Russian Science Foundation project no. 22–27-00131.

### *Введение*

Гумусовое вещество – ключевое звено в глобальном цикле трансформации биологического материала в наземных и водных экосистемах. Макромолекулы гуминовых веществ характеризуются высокой сложностью состава и строения, так как в процессе гумификации органики происходит стохастический отбор наиболее термодинамически устойчивых к условиям окружающей среды структур [1]. Таким образом, синтез гуминового вещества служит фактором стабилизации органического вещества, замедляющим его минерализацию до более простых веществ, в том числе, парниковых газов. Деградация вечной мерзлоты и связанное с ней вовлечение в биогеохимические процессы законсервированного мерзлого органического вещества обуславливает научный интерес к геохимическим исследованиям не только почв и торфяников Арктической зоны [2, 3, 4], но и донных отложений озер [5, 6]. Вопрос изучения гумусового вещества имеет и важный геоэкологический аспект с точки зрения оценки качества озерных вод, так как озера часто являются объектами хозяйственного и питьевого водоснабжения местного населения. Гумусовые кислоты (фульвовые и гуминовые) активно взаимодействуют с органическими и неорганическими веществами [7]. Такие реакции, с одной стороны, приводят к повышению геохимической подвижности элементов, например, в растворимых фульватных комплексах. С другой стороны, гуминовые кислоты способны инактивировать токсичные металлы, связывая их в устойчивые комплексные соединения [8].

Химические свойства и роль гуминовых веществ в экосистемах определяется их строением, которое зависит от условий гумификации: климатических, биогеографических и геологических характеристик территории, а также физико-химических параметров среды. Территория Ямало-Ненецкого автономного округа характеризуется высокой степенью заозеренности преимущественно из-за развития термокарстовых процессов. В региональных исследованиях внимание уделяется гумусу почв [9, 10], а данные по составу и строению гуминовых веществ отложений озер территории, полученные с помощью современных аналитических методов, практически отсутствуют. В данной работе была поставлена цель впервые подробно исследовать состав и строение, а также условия образования и роль преобладающей фракции гуминовых веществ – гуминовых кислот (ГК) – в донных отложениях озер Полярного Урала и прилегающей части ямальской тундры.

### *Объекты и методы исследования*

В работе изучены два горных озера Полярного Урала (Усвато и Большое Щучье) и два тундровых озера, расположенных в прилегающей к горной цепи западной части Ямала (рис. 1). Котловины горных озер имеют тектоническое происхождение, поэтому их берега представлены крутыми скалистыми склонами со скудной тундровой растительностью. Береговые зоны предгорных термокарстовых озер заболочены и покрыты мохово-лишайниковой растительностью с зарослями осоки, карликовой березы и ивы. Озеро Большое Щучье является крупнейшим по площади (11,85 км<sup>2</sup>) в пределах Полярного Урала [11]. Площадь зеркала остальных изученных озер не превышает 1 км<sup>2</sup> (оз. Усвато и озеро №1), либо практически равно ему (оз. Хойнгылнато). Водосборные бассейны озер находятся в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Полевые работы проводились с ледового покрова озер в рамках снеговой экспедиции Воркута-Салехард, организованной ФГБУ ААНИИ и Институтом озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН [12]. Взятие проб воды осуществлялось батометром из поверхностного горизонта водной толщи. Донные отложения (слой 0 – 10 см) отбирались коробчатым дночерпателем Экмана Берджи в 2-3 точках в центральной части оз. Усвато, оз. Хойнгылнато и озера № 1 (без названия), глубина в точках отбора не превышала 2 м. Данные озера в зимний период промерзают практически до дна: толщина льда составляла 1,2 – 1,5 м. При отборе проб было отмечено, что вода в тундровых озерах (Хойнгылнато и №1) имеет коричневый цвет [12]. В оз. Большом Щучьем пробы были взяты в районе самой глубоководной части котловины с глубины 150 м.

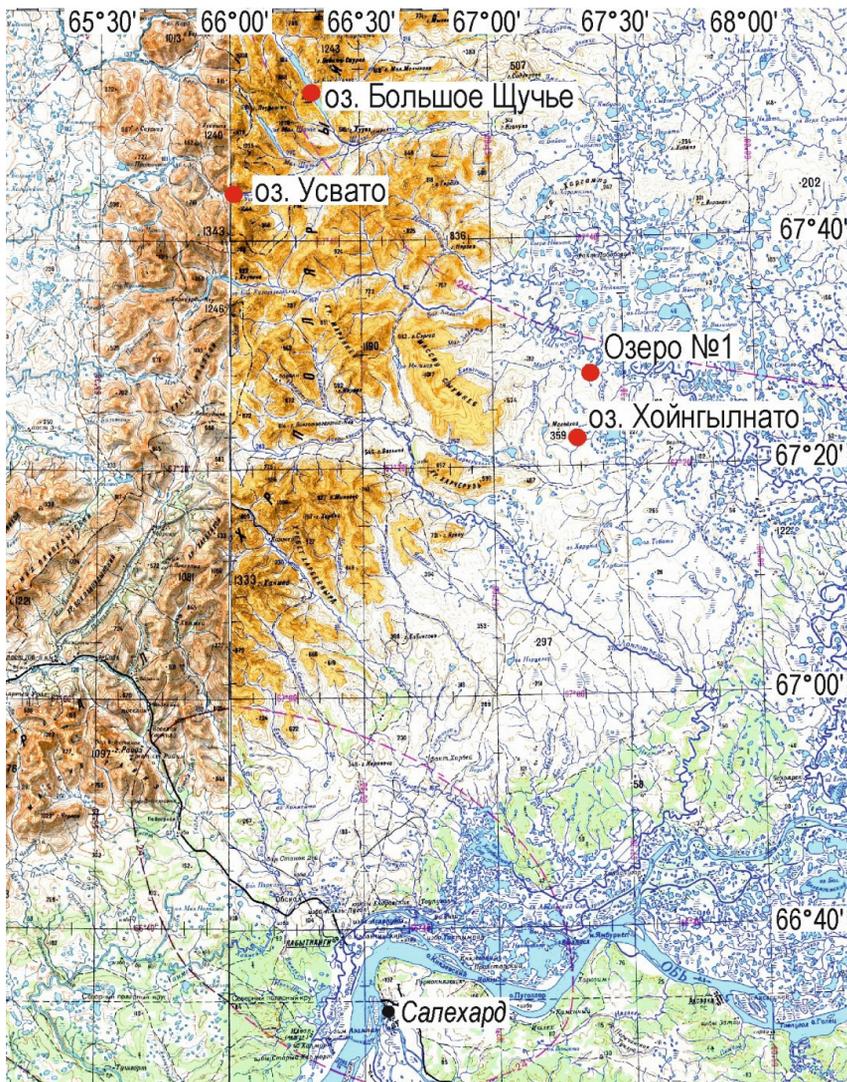


Рис. 1. Карта расположения исследованных озер Полярного Урала и ямальской тундры

Сразу после отбора проб с помощью портативных приборов Melwakee (США) измерялись физико-химические параметры воды (минерализация, рН и Eh) и донных отложений (рН и Eh). При полевом описании донных грунтов принимались во внимание их цвет, гранулометрический состав, наличие неразложившихся растительных остатков и пузырей газа.

В лаборатории образцы донных отложений высушивались до воздушно-сухого состояния при 20 °С, измельчались в ступке и просеивались через сито 2 мм для удаления крупных растительных остатков.

Для характеристики озерных отложений по степени обогащенности рассеянным органическим веществом по ГОСТ 23740-2016 определялись потери при прокаливании в течение 5 ч. при 550 °С (ППП, масс. %) в 2-3 отобранных из каждого озера образцах в двукратной повторности, затем рассчитывалось среднее значение.

Щелочная экстракция ГК производилась из смешанной методом квартования интегральной пробы для каждого озера согласно рекомендациям Международного общества по изучению гуминовых кислот (IHSS), [13]. Далее анализировался элементный состав образцов (масс. % С, Н, N и O) на СНN-анализаторе Euro EA3028-НТ, результаты корректировались на безводную и беззольную навеску. Твердофазная <sup>13</sup>С ЯМР-спектроскопия является наиболее мощным инструментом исследования структуры ГК [2, 14, 15, 16]. ИК-Фурье спектрометрия позволяет анализировать функциональные группы органических молекул и дополнительно верифицировать результаты ЯМР. В данной работе ЯМР- и ИК-спектры регистрировались на спектрометрах Bruker Avance III WB 400 NMR (США) и IRAffinity (Япония) соответственно. Параметры измерений подробно изложены в предыдущих исследованиях ГК озерных отложений других регионов [5, 6]. Корректировка и обработка спектров производилась в программах Mestrenova 8.0 и Magicplot.

Для интерпретации элементного состава образцов ГК с помощью графико-статистического анализа рассчитывались атомные соотношения Н/С и О/С, а также степень окисленности по Д.С. Орлову [1]:  $W = (2O - H)/C$ .

В структуре определялась доля основных фрагментов, характерных для ГК, в соответствии с их химическим сдвигом [17]: С, Н-замещенные алифатические (0 – 47 ppm); метоксилы и О, N-замещенные алифатические (47 – 60 ppm); алифатические, дважды замещенные гетероатомами (включая углеводы) и метиновым углеродом простых и сложных эфиров (60 – 110 ppm); Н-замещенные ароматические (110 – 144 ppm); О, N-замещенные ароматические (144 – 160 ppm); карбоксильные группы, сложные эфиры, амиды и их производные (160 – 185 ppm); карбонильные группы альдегидов и кетонов (185 – 200 ppm).

Для характеристики макромолекул ГК была оценена степень их ароматичности (1) и алифатичности (2):

1.  $AR = \%C(110 - 160 \text{ ppm}) / \%C(0 - 160 \text{ ppm}) \times 100$
2.  $AL = \%C(0 - 110 \text{ ppm}) / \%C(0 - 160 \text{ ppm}) \times 100$

Степень разложенности (гумификации) органического вещества оценивалась по отношению незамещенной С, Н-алифатики к О, N-замещенной:  $Al\ H, R + Ar\ H, R, \%$  (сумма незамещенных углеводородных алифатических и ароматических фрагментов) дает информацию об устойчивости ГК к окислению (гидрофобности молекул).

### Результаты исследования

Физико-химические параметры водной толщи и донных отложений, полевое описание грунтов исследованных озер, а также содержание в них органического вещества (ППП, масс. %) представлены в таблице 1. Тип отложений определен по классификации Н.М. Страхова [18]. Элементный состав изученных образцов ГК представлен в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические параметры воды и донных отложений изученных озер Полярного Урала и ямальской тундры

Озеро	Водная толща (поверхностный горизонт)			Донные отложения (слой 0 – 10 см)				
	М, г/л <sup>1</sup>	pH	Eh, mV	Описание	pH	Eh, mV	ППП, масс. % <sup>2</sup>	Тип отложений
Усвато	0,01	5,98	254	Суглинок серый, мягкопластичный, растительных остатков нет.	6,3	-60	2,0	Минеральные илы
Б. Щучье	0,01	6,36	198	Суглинок серый, мягкий. Верхний слой 0-1 см - коричневый, по толще отложений много черных примазок.	6,6	-20	3,8	
Озеро №1	0,07	6,18	145	В прибрежной зоне дно щебнистое, присутствуют фрагменты растительных остатков, сносимых с берега. В центральной части отобраны пробы суглинка серого, мягкого. На поверхности отмечен коричневый налет.	6,5	-100	8,1	
Хойнгылнато	0,21	6,79	47	В прибрежной зоне дно щебнистое, присутствуют фрагменты торфа, сносимого с берегов. В центральной части отобраны пробы суглинка серого, мягкого.	6,5	-24	18,1	Слабо сапропелевые илы

Примечание. <sup>1</sup> – минерализация, <sup>2</sup> – дано среднее значение для проб из 2-3 точек отбора.

Таблица 2. Элементный состав на беззольную и безводную навеску гуминовых кислот, выделенных из донных отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры

Озеро	Масс. %				Мольная доля				Атомные отношения		
	N	C	H	O	N	C	H	O	O/C	H/C	W
Усвато	3,5	46,3	5,4	40,3	2,1	32,2	44,7	21,0	0,7	1,4	-0,1
Б. Щучье	5,3	44,3	6,1	39,5	3,0	29,3	48,0	19,6	0,7	1,6	-0,3
Озеро №1	3,5	44,4	4,9	42,3	2,2	32,2	42,6	23,0	0,7	1,3	0,1
Хойнгылнато	3,1	44,7	4,8	42,4	1,9	32,7	42,0	23,3	0,7	1,3	0,1

В ЯМР-спектрах образцов ГК с разной степенью интенсивности идентифицированы все молекулярные фрагменты, характерные для данных

соединений [17]. Полученные спектры и доли различных типов углерода представлены на рисунке 2 и в таблице 3 соответственно.

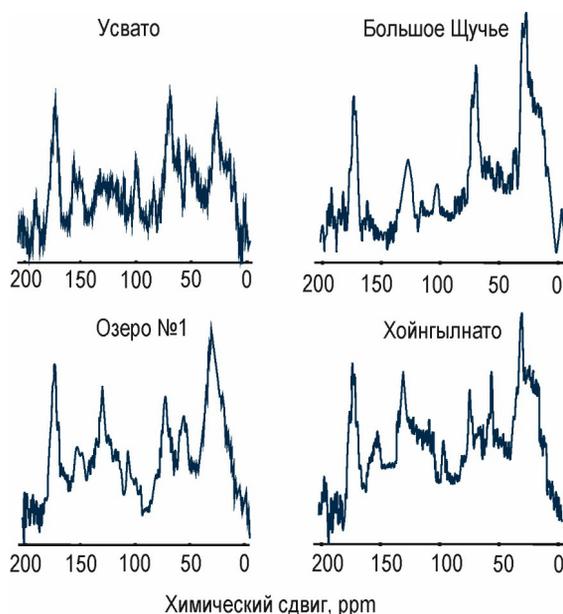


Рис. 2. <sup>13</sup>С ЯМР-спектры гуминовых кислот, выделенных из донных отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры

Таблица 3. Процентное содержание углерода в различных молекулярных фрагментах ГК, выделенных из донных отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры (по результатам <sup>13</sup>С ЯМР-спектроскопии)

Озеро	Химический сдвиг, ppm (%)							AR <sup>1</sup>	A <sup>1,2</sup>	A <sup>1</sup> H,R + Ar H,R <sup>3</sup>	C,H- al/ O,N- al <sup>4</sup>
	0 – 47	47 – 60	60 – 110	110 – 144	144 – 160	160 – 185	185 – 200				
Усвато	25	9	27	20	5	11	2	29	71	45	0,7
Б. Щучье	48	3	27	7	2	10	3	10	90	55	1,6
Озеро №1	31	9	20	21	7	10	2	32	68	52	1,1
Хойнгылнато	33	7	26	14	12	8	1	28	72	46	1,0

Примечание. <sup>1</sup> – степень ароматичности, <sup>2</sup> – степень алифатичности, <sup>3</sup> – индекс гидрофобности, <sup>4</sup> – соотношение незамещенной и замещенной алифатики.

В ИК-спектрах (рис. 3) также обнаружены ключевые полосы поглощения структурных компонентов ГК [19]. Валентные (2920 и 2860 см<sup>-1</sup>) и деформационные (1460 – 1440 см<sup>-1</sup>) колебания алифатических фрагментов, а также пик ароматических фрагментов (1590 – 1700 см<sup>-1</sup>) прослеживаются на всех спектрах образцов. ОН– и –NH группы с водородными

связями дают широкую полосу поглощения в области  $3500 - 3300 \text{ см}^{-1}$  и слабые полосы в районе  $1270 - 1220$  и  $1170 - 1040 \text{ см}^{-1}$ . Валентные колебания  $\text{C}=\text{O}$  от карбоксилов и кетонов идентифицируются по пику в  $1710 \text{ см}^{-1}$ . Пик в районе  $1540 - 1510 \text{ см}^{-1}$ , отмечаемый в образце оз. Усвато, обусловлен деформационными колебаниями  $\text{N}-\text{H}$  и  $\text{C}=\text{N}$ . В остальных спектрах данные полосы представлены неясными пиками или плечами. Полосы валентных колебаний  $\text{C}-\text{O}$  первичных спиртов (включая углеводы) обнаруживаются во всех спектрах в районе  $1075 - 1013 \text{ см}^{-1}$ .

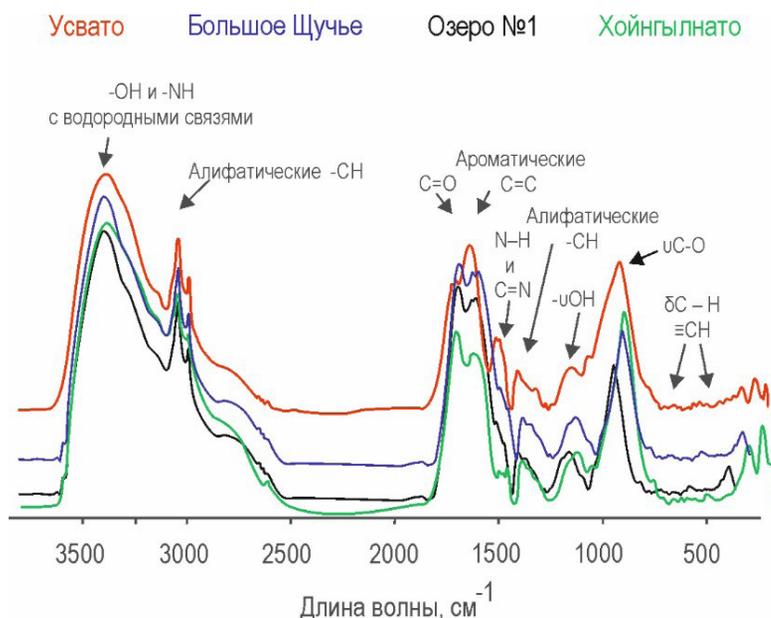


Рис. 3. ИК-спектры гуминовых кислот, выделенных из донных отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры

### *Обсуждение результатов*

Отложения исследованных озер характеризуются преимущественно низкими содержаниями органического вещества и относятся к минеральным и слабо сапропелевым илам (таблица 1). В прибрежную часть малых озер ямальской тундры поступают растительные остатки и фрагменты торфа, слагающего их берега. Наличие практически неразложенного биологического материала косвенно свидетельствует о медленной постседиментационной деструкции органики и ее консервации в озерных отложениях, что отмечается и для тундровых озер других регионов [5, 6]. В центральных частях всех изученных озерных котловин накапливаются серые мягкие илы.

Воды всех рассмотренных озер пресные и слабокислые, что в целом характерно для водных объектов Арктической зоны РФ. В исследованных горных озерах Полярного Урала вода в зимний период была прозрачной, так как они сильно обеднены органическим веществом [20]. В тундре, напротив, вода в озерах окрашивается растворенными гуминовыми веществами в коричневый цвет. Данный процесс особенно характерен для термокарстовых озер в зимнее время, когда они промерзают практически до дна, и гумусовые кислоты концентрируются в остатках воды [21]. Поверхностный горизонт вод даже в зимний подледный период характеризуется переходными окислительными условиями с положительными значениями ОВП (Eh), (таблица 1). В донных отложениях всех озер отмечены слабокислые значения pH. В зимний подледный период Eh находится в отрицательной области, но не фиксировались значения ниже -100 mV, что соответствует переходной слабовосстановительной обстановке. На поверхности отложений отмечается тонкий ржаво-коричневый окисленный налет, что также косвенно свидетельствует об аэробных условиях в придонных слоях воды.

По элементному составу ГК донных отложений исследованных озер сходны между собой, что свидетельствует о близких условиях процессов гумификации. Если провести сравнение элементного состава ГК донных отложений изученных озер с таковым в других природных средах, выявляются следующие закономерности. В проанализированных ГК арктических озерных отложений отмечается в среднем меньшее содержание углерода и большая доля кислорода в молекулах по сравнению с ГК разных типов почв умеренных и субтропических широт по данным работ [1, 22] (таблица 4). С почвенными ГК островов Арктики [2, 16] разница по этим параметрам практически не отмечается. Для ГК отложений термокарстовых озер дельты р. Лены [5] и тундровых озер полуостровов Рыбачий и Средний [6] показано большее обеднение углеродом по сравнению с почвами, чем для изученных озер Полярного Урала и Ямала (таблица 4).

Таблица 4. Элементный состав гуминовых кислот, выделенных из разных природных источников. В числителе дан диапазон значений, в знаменателе – среднее

Источники гуминовых веществ	N	C	H	O
	Масс. %			
Гуминовые кислоты почв [1], n ≈ 300	$\frac{3-5}{4}$	$\frac{53-58}{56}$	$\frac{3-6}{5}$	$\frac{33-42}{36}$
Гуминовые кислоты почв [22], n = 215	$\frac{1-7}{4}$	$\frac{37-64}{55}$	$\frac{5-5,3}{4,8}$	$\frac{27-52}{36}$

Продолжение таблицы 4

Источники гуминовых веществ	N	C	H	O
	Масс. %			
Гуминовые кислоты почв островов Арктики [2, 16], n = 24	$\frac{1-5}{3}$	$\frac{27-53}{46}$	$\frac{3-6}{5}$	$\frac{33-64}{41}$
Гуминовые кислоты донных отложений озер дельты р. Лены [5], n = 8	$\frac{1-3}{2}$	$\frac{28-48}{37}$	$\frac{3-6}{4}$	$\frac{40-61}{52}$
Гуминовые кислоты донных отложений озер полуостровов Средний и Рыбачий [6], n = 6	$\frac{3-4}{3}$	$\frac{26-47}{36}$	$\frac{4-5}{5}$	$\frac{40-62}{52}$
Гуминовые кислоты донных отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры, n = 4	$\frac{3-5}{4}$	$\frac{44-46}{45}$	$\frac{5-6}{5}$	$\frac{40-41}{42}$

Атомные отношения Н/С в молекулах ГК изученных озер высокие (таблица 2), что по степени насыщенности соответствует циклопарафинам [1]. Данный факт говорит о преимущественно алифатической природе проанализированных соединений. Степень окисленности молекул ГК (W) близка к нулю, что также видно по сходным значениям О/С.

Из-за стохастической природы образования ГК наблюдается значительная изменчивость их состава внутри разных групп гумусовых веществ, поэтому такие соединения могут описываться лишь статистически с помощью интервалов вариаций наиболее контрастных параметров [22]. При сравнении представительных выборок образцов становится возможным определение тенденций и особенностей, отличающих ГК из различных природных источников. Полученные в разных работах по изучению элементного состава ГК озерных отложений и почв данные были помещены на диаграмму графико-статистического анализа [1] (рис. 4). График согласуется с накопленными почвоведомы результатами о том, что по содержанию углерода гуминовые вещества разных групп образуют практически непрерывный ряд изменений [1]. По сравнению с почвенными ГК озерных отложений, особенно холодных климатических условий, характеризуются большей насыщенностью и окисленностью. При сравнении с сапропелями умеренных широт также наблюдается сдвиг всего массива точек озер Арктической зоны вверх и вправо. Точки образцов Полярного Урала и Ямала характеризуются наиболее близким к озерам умеренных широт положением, что говорит о несколько большей степени зрелости ГК их отложений по сравнению с другими изученными регионами Арктики [5, 6]. Стоит отметить, что анализ элементного состава дает лишь общее представление о направлениях гумификации и не позволяет делать выводы о тонких различиях в строении гуминовых веществ [1].

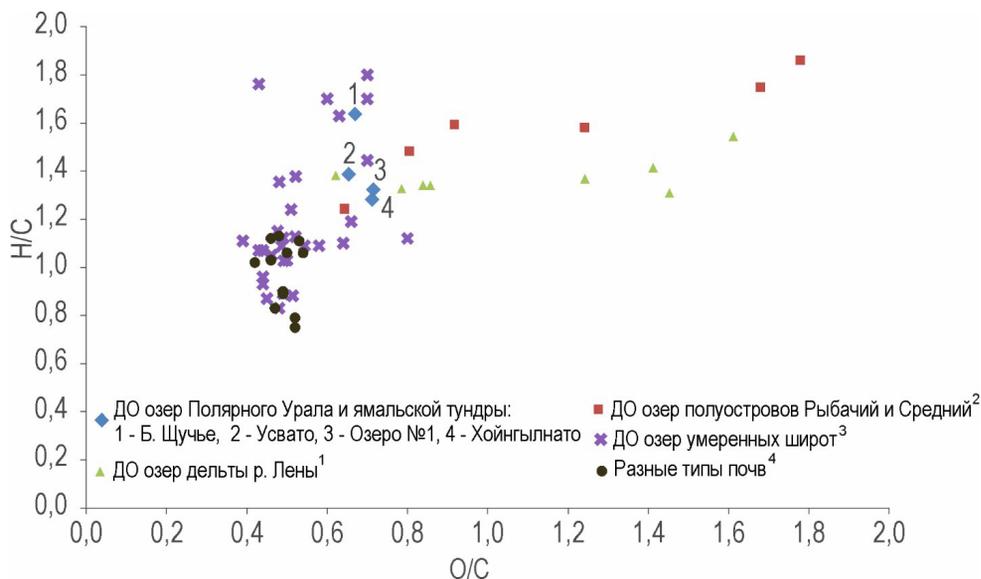


Рис. 4. Диаграмма сравнения атомных отношений элементов в гуминовых кислотах из донных отложений озер (ДО) и почв: 1 – по данным [5]; 2 – по данным [6]; 3 – по данным для озер Иркутской обл. [23], Новосибирской обл., [24]; г. Сургута [25], Канады [14], Польши [26], Латвии [27]; 4 – усредненные данные по разным типам почв умеренных и субтропических широт по Д.С. Орлову [1]

Результаты структурного анализа образцов ГК из отложений изученных озер, как и в случае элементного анализа, также свидетельствуют об общности природы этих соединений – ключевые спектральные пики и полосы поглощения с некоторой степенью вариативности характеризуются близкими положениями и уровнем интенсивности. Так, в структуре всех образцов ГК отмечается преобладание алифатических фрагментов, степень алифатичности (AL) превышает 60% (таблица 3). Наиболее конденсированные (ароматические) макромолекулы ГК наблюдаются в отложениях озера № 1, а наименее – в оз. Большом Щучьем. В ароматической части значительно преобладает С,Н-ароматика (110 – 144 ppm) по сравнению с О,Н-замещенной (144 – 160 ppm). В алифатической составляющей О,Н-замещенные фрагменты (47 – 110 ppm) играют значительную роль, их количество практически равно незамещенной углеводородной алифатике, а иногда и превосходит ее. Исключение составляет оз. Большое Щучье, где процентная доля незамещенной алифатики наибольшая. В составе О,Н-замещенных фрагментов сосредоточены слабоизмененные углеводные и пептидные цепочки, входящие в гидролизуемую часть молекул [1]. Суммарная доля карбоксильных, амидных и карбонильных групп практически не отличается между образцами. Однако на ИК-спектре

оз. Усвато полоса  $\text{C}=\text{O}$  относительно слабая, в то время как пик, соответствующий колебаниям  $\text{N}=\text{H}$  и  $\text{C}=\text{N}$ , выражен ясно (рис. 3). Следовательно, в поглощение на ЯМР-спектре в районе 160 – 185 ppm в образце оз. Усвато значительный вклад вносят амидные группы.

Корректное сравнение структурных особенностей ГК необходимо проводить по данным, полученным сходными аналитическими методами. Для гумусового вещества донных отложений озер результаты  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектроскопии весьма ограничены, носят эпизодический характер и сосредоточены преимущественно на умеренных и субтропических широтах [14, 15, 23, 28]. Для ГК разных регионов и типов почв накоплен наиболее обширный массив данных, поэтому для сравнения были взяты некоторые наиболее изученные типы почв [2, 16, 29, 30, 31, 32]. Сравнение результатов производилось по наиболее крупным областям спектров, соответствующим основным составляющим макромолекул ГК:  $\text{C}_{\text{Ar}}$  (110 – 160 ppm);  $\text{C}_{\text{O,N-al}}$  (47 – 110 ppm) и  $\text{C}_{\text{COOH/C=O}}$  (160 – 200 ppm).

На рисунке 5 показано, что ГК отложений озер арктических широт характеризуются низкими содержаниями ароматических структур по сравнению с почвами умеренных и субтропических широт. Разница в степени ароматичности молекул ГК озерных отложений и почв Арктики в среднем не отмечается. В целом, ГК отложений озер разных климатических зон характеризуются преимущественно алифатической природой.

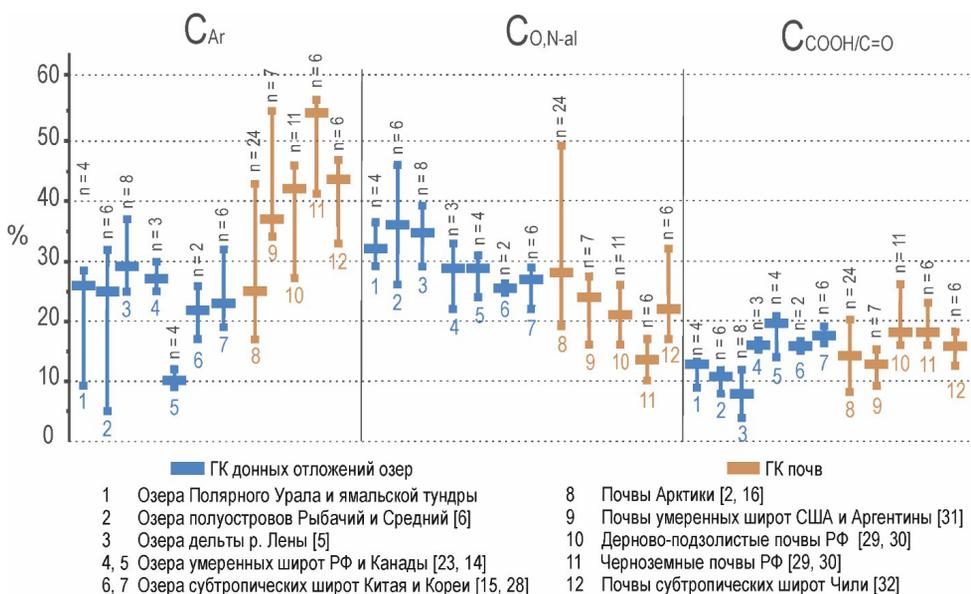


Рис. 5. Доля (%) основных структурных фрагментов в молекулах гуминовых кислот из отложений озер и почв разных климатических зон. Дан диапазон значений и медиана, n – численность выборки

ГК отложений озер Арктики наиболее четко отличают от озер умеренной и субтропической зон, а также разных типов почв по высокой доле O,N-замещенной алифатики и, напротив, низкому содержанию COOH/C=O групп в структуре. Стоит отметить, что для выявления наличия или отсутствия аналогичной почвам климатической зональности строения ГК в донных отложениях озер разных климатических зон требуется дальнейшее накопление сравнимых данных.

Результаты состава и строения ГК позволяют судить об условиях, в которых протекает гумификация органического вещества в исследованных озерах Полярного Урала и ямальской тундры. Преобладание алифатических фрагментов и сохранение в структуре значительного количества полисахаридных и пептидных цепочек – общая черта ГК слабой степени зрелости в почвах и донных отложениях озер холодного климата [3, 5, 6]. В условиях замедленной биохимической активности быстрого расщепления прекурсоров гумификации до мономеров и синтеза конденсированного (ароматического) ядра практически не происходит, высокомолекулярные структуры сохраняются длительное время и медленно трансформируются в гумусовые кислоты [1]. Важно также отметить, что углеводные структуры являются наиболее энергетически богатыми и легкодоступными составляющими ГК, поэтому они перерабатываются микроорганизмами до парниковых газов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) в первую очередь [33]. В изученных озерах наименее конденсированные ГК наблюдаются в глубоководном горном оз. Большом Щучьем, а наиболее зрелые – в термокарстовом тундровом озере №1. На диаграмме на рисунке 6 показано, что увеличение степени гумификации ГК (потеря углеводных и пептидных фрагментов) сопряжено с увеличением гидрофобности их молекул (устойчивость к минерализации). Наиболее зрелыми по упомянутым выше параметрам среди изученных озер Полярного Урала и Ямала являются ГК оз. Большого Щучьего, так как их молекулы представлены преимущественно насыщенными углеводородными цепочками, что согласуется с высоким соотношением H/C в их молекулах (таблица 2). В целом гуминовые кислоты отложений озер различных регионов Арктики с некоторой вариативностью имеет схожую степень гумификации (рис. 6).

В озерах № 1 и Хойнгылнато отмечено поступление торфяного материала с водосборной площади, который уже прошел частичную гумификацию в аэральных условиях суши. Данный факт может оказывать влияние на ароматичность выделяемых из донных отложений ГК. Кроме того, на строении ГК сказывается и химический состав прекурсоров гумификации. Так, низкие содержания лигнина в мохово-лишайниковой растительности [34] согласуются с недостатком ароматических структур в гумифицирующемся материале донных отложений озер тундровой зоны Полярного Урала и Ямала. Связь между степенью конденсации макро-

молекул и климатическими условиями выявлена для ГК почв и мерзлых торфяников Арктики [3, 4].

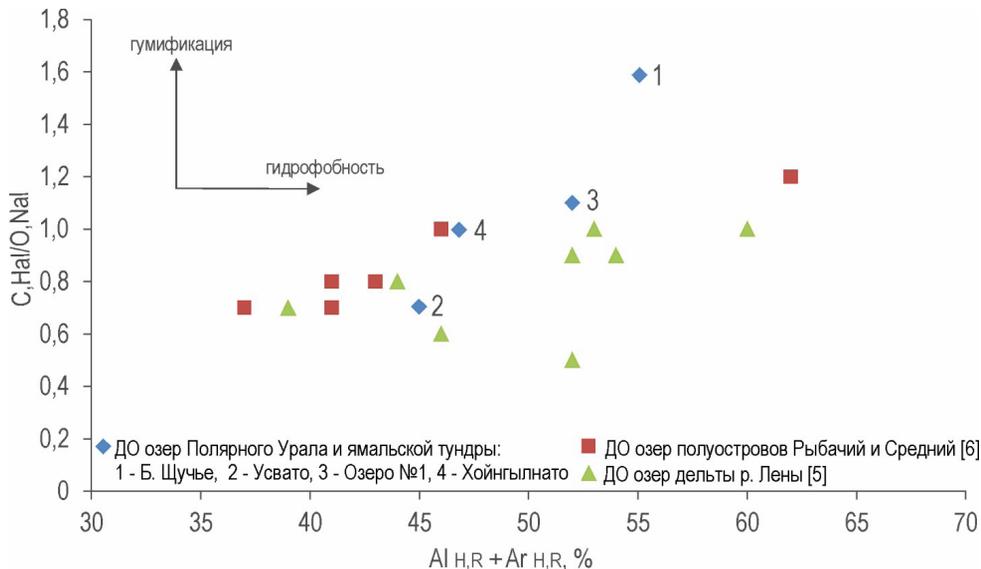


Рис. 6. Диаграмма гумификации гуминовых кислот из донных отложений тундровых озер

Реакционная способность гуминовых веществ с компонентами почв и донных отложений обусловлена наличием в их структуре функциональных групп. В составе ГК изученных озер по результатам ЯМР и ИК-спектрометрии показано наличие кислородсодержащих группировок: карбоксильных, карбонильных и гидроксильных. Преимущественно карбоксилы участвуют во взаимодействии ГК с основными катионами природных вод ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) с последующим образованием растворимых гуматов с щелочами и нерастворимых – с щелочноземельными металлами. Последние существуют в виде пленок на грубых частицах донных отложений. Кроме того, кислородсодержащие фрагменты взаимодействуют с глинистыми минералами, формируя хемосорбционные комплексы [35]. Однако в настоящей работе отмечено, что содержание карбоксильных и карбонильных групп в ГК отложений озер меньше, чем в почвах (рис. 5). Такая структура не способствует прочному закреплению ГК на минеральной части отложений и их дальнейшей гумификации [36]. Кроме того, относительно низкая доля кислородных функциональных групп косвенно свидетельствует о невысокой способности отдельных молекул ГК хелатировать ионы переходных металлов, многие из которых являются загрязнителями окружающей среды.

### *Заключение*

Впервые проведен комплексный анализ состава и структуры гуминовых кислот, выделенных из донных отложений двух горных озер Полярного Урала и двух термокарстовых озер ямальской тундры. Образцы характеризуются элементарным составом и структурой, присущей данной щелочнорастворимой фракции гумусового вещества.

Содержание углерода в макромолекулах проанализированных гуминовых кислот ниже, чем в почвах умеренных и субтропических широт, а доля кислорода - выше. Исследованные образцы имеют сходный состав с гуминовыми кислотами почв и отложений озер других регионов Арктики. В структуре ГК отложений озер Полярного Урала и ямальской тундры преобладают алифатические фрагменты, а в гидролизуемой части значительную долю составляют полисахаридные и пептидные цепочки.

В донных отложениях изученных озер трансформация органического вещества протекает в слабовосстановительных условиях. Гумификация замедлена, преобладают процессы минерализации, поэтому зрелое ароматическое ядро гуминовых кислот практически не образуется, а в структуре накапливаются слабоизмененные полисахаридные и пептидные остатки. Показанные в работе особенности строения гуминовых кислот в целом характерны для продуктов гумификации холодных климатических условий. Важно отметить, что углеводные составляющие гумуса являются энергетически богатыми и легкодоступными составляющими ГК, поэтому они перерабатываются микроорганизмами в первую очередь. Следовательно, слабую устойчивость органического вещества озерных отложений Арктики к минерализации необходимо учитывать для дальнейших оценок роли озер и подозерных таликов в эмиссии парниковых газов.

В составе изученных гуминовых кислот обнаружены кислородсодержащие группы, обуславливающие их взаимодействие с ионами природных вод и минеральной частью донных отложений. Данные молекулярные фрагменты могут связывать металлы-загрязнители окружающей среды в устойчивые комплексы, снижая геохимическую подвижность ионов. Однако содержание функциональных групп в макромолекулах ГК озерных отложений ниже по сравнению с ГК почв. Результаты следует использовать при планировании геоэкологического мониторинга и прогнозирования самоочищающей способности водоемов региона.

### *Список источников*

1. Орлов Д.С. Химия почв / Д.С. Орлов. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 376 с.
2. Polyakov V., Chegodaeva N., Abakumov E. Molecular and elemental composition of humic acids isolated from selected soils of the Russian Arctic

- / V. Polyakov, N. Chegodaeva, E. Abakumov // Tomsk State University Journal of Biology. – 2019. – № 47. – P. 6-21.
3. Lodygin E., Vasilevich R. Environmental aspects of molecular composition of humic substances from soils of northeastern European Russia / E. Lodygin, R. Vasilevich // Polish Polar Research. – 2020. – № 41. – P. 115-135.
  4. Vasilevich R., Lodygin E., Abakumov E. The Molecular Composition of Humic Acids in Permafrost Peats in the European Arctic as Paleorecord of the Environmental Conditions of the Holocene / R. Vasilevich, E. Lodygin, E. Abakumov // Agronomy. – 2022. – № 12. – 2053.
  5. Guzeva A.V., Krylova E.A., Fedorova I.V. Environmental aspects of molecular composition of humic acids isolated from lake sediments of a permafrost-affected area of the Arctic / A.V. Guzeva, E.A. Krylova, I.V. Fedorova // Polish Polar Research. – 2021. – V. 42. – № 3. – P. 173–191.
  6. Гузева А.В., Слуковский З.И. Геохимическая характеристика гуминовых кислот, выделенных из отложений тундровых озер Мурманской области / А.В. Гузева, З.И. Слуковский // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 1. – С. 78-92.
  7. Дину М.И. Сравнение комплексообразующих способностей фульвокислот и гуминовых кислот с ионами железа и цинка / М.И. Дину // Водные ресурсы. – 2010. – № 1. С. 65-69.
  8. Dong Y., Lin H., Zhao Y., Menzembere E. Remediation of vanadium-contaminated soils by the combination of natural clay mineral and humic acid / Y. Dong, H. Lin, Y. Zhao et al. // Journal of Cleaner Production. – 2021. – № 279. – 123874.
  9. Колесников Р.А., Печкин А.С., Моргун Е.Н. Почвы Ямало-Ненецкого автономного округа (морфология и разнообразие) / Р.А. Колесников, А.С. Печкин, Е.Н. Моргун. – Салехрад, СПб: ГеоГраф, 2022. – 100 с.
  10. Abakumov E., Petrov A., Polyakov V., Nizamutdinov T. Soil Organic Matter in Urban Areas of the Russian Arctic: A Review / E. Abakumov, A. Petrov, V. Polyakov et al. // Atmosphere. – 2023. – № 14. – 997.
  11. Печкин А.С., Кириллов В.В., Ковешников М.И., Красненко А.С., Салтыков А.В., Тимкин А.В., Дьяченко А.В. Морфометрическая характеристика озера Большое Щучье / А.С. Печкин, В.В. Кириллов, М.И. Ковешников и др. // Научный вестник ЯНАО. – 2017. – Т. 3. – № 96. – С. 48-51
  12. Демидов Н.Э., Гузева А.В., Лапенков А.Е. На снегоходе от Воркуты через полярный Урал в Ямальскую тундру / Н.Э. Демидов, А.В. Гузева, А.Е. Лапенков // Российские полярные исследования. – 2022. – Т. 3 – № 49. – С. 18-23.
  13. Swift R. Organic matter characterization / D.L. Sparks et al. // Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science Society of America. – 1996. – 5. – P. 1018-1020.

14. Belzile N., Joly H., Li H. Characterization of humic substances extracted from Canadian lake sediments / N. Belzile, H. Joly, H. Li // *Canadian Journal of Chemistry*. – 1997. – № 75. – P. 14-27.
15. He M., Shi Y., Lin Ch. Characterization of humic acids extracted from the sediments of the various rivers and lakes in China / M. He, Y. Shi, Ch. Lin // *Journal of Environmental Sciences*. – 2008. – № 20. – P. 1294-1299.
16. Polyakov V., Abakumov E. Assessments of Organic Carbon Stabilization Using the Spectroscopic Characteristics of Humic Acids Separated from Soils of the Lena River Delta / V. Polyakov, E. Abakumov // *Separations*. – 2021. – № 8. – 87.
17. Yao S-H., Zhang Y-L., Han Y., Han X-Z., Mao J-D., Zhang B. Labile and recalcitrant components of organic matter of a Mollisol changed with land use and plant litter management: An advanced <sup>13</sup>C-NMR study / S-H Yao, Y-L Zhang, Y. Han // *Science of the Total Environment*. – 2019. – № 660. – P. 1-10.
18. Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратев М.А. Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах / Н.М. Страхов, Н.Г. Бродская, Л.М. Князева и др. – М.: АН СССР, 1954. – 791 с.
19. Ribeiro J.S., Ok S., Garrigues S., Guardia M. FTIR tentative characterization of humic acids extracted from organic materials. / J.S. Ribeiro, S. Ok, S. Garrigues et al. // *Spectroscopy Letters*. – 2001. – V. 34. – № 2. – P. 179-190.
20. Богданов В.Д., Богданова Е.Н., Гаврилов А.Л., Мельниченко И.П., Степанов Л.Н., Ярушина М.И. Биоресурсы водных экосистем полярного Урала / В.Д. Богданов, Е.Н. Богданова, А.Л. Гаврилов. – Екатеринбург, 2004. – 167 с.
21. Томирдиаро С.В. Вечная мерзлота и освоение горных стран и низменностей (на примере Магаданской области и Якутской АССР) / С.В. Томирдиаро. – Магадан: Магаданское книжное издание, 1972. – 172 с.
22. Rice J.A., MacCarthy P. Statistical Evaluation of the Elemental Composition of Humic Substances / J. A. Rice, P. MacCarthy // *Organic Geochemistry*. – 1991. – № 17. – P. 635-648.
23. Semenova Z.V., Kushnarev D.F., Litvintseva M.A., Rokhin A. V. Humic acids from the sapropel of Lake Ochaul / Z.V. Semenova, D.F. Kushnarev, M.A. Litvintseva et al. // *Soil Fuel Chem*. – 2007. – № 41. – P. 129-133.
24. Сартаков М.П., Шпынова Н.В., Дерябина Ю.М., Комиссаров И.Д. Элементный состав гуминовых кислот сапропелей Среднего Приобья и юга Обь-Иртышского бассейна Западной Сибири / М.П. Сартаков, Н.В. Шпынова, Ю.М. Дерябина и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2015. – № 5. – С. 523-526.
25. Шпынова Н.В., Сартаков М.П. Комиссаров И.Д. Ефанов М.В. Элементный состав гуминовых кислот исходных и термообработанных

- сапропелей озер Сургутского района ХМАО-Югры / Н.В. Шпынова, М.П. Сартаков, И.Д. Комиссаров // *Современные технологии*. – 2018. – № 9. – С. 161-165.
26. Golebiowska D., Mielnik L., Gonet S. Characteristics of humic acids in bottom sediments of Lobelia lakes / D. Golebiowska, L. Mielnik, S. Gonet // *Environment International*. – 1996. – № 22. – P. 571-578.
27. Klavins M., Apsite E. Sedimentary humic substances from lakes in Latvia / M. Klavins, E. Apsite // *Environment International*. – 1997. – № 23. – P. 783-790.
28. Hur J., Lee D-H., Shin S. H. Comparison of the structural, spectroscopic and phenanthrene binding characteristics of humic acids from soils and lake sediments / J. Hur, D-H. Lee, S. Shin // *Organic Geochemistry*. – 2009. – V. 40. – № 10. – P. 1091-1099.
29. Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: дис. ... доктора хим. наук. / И.В. Перминова. – Москва: МГУ, 2000. – 359 с.
30. Kholodov V., Konstantinov A., Kudryavtcev A., Perminova I. Composition of humic acids of zonal series based on  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy / V. Kholodov, A. Konstantinov, A. Kudryavtcev et al. // *Pochvovedenie*. – 2011. – № 9. – P. 1064-1173.
31. Lobartini J., Tan K. Differences in humic acids characteristics as determined by carbon-13 nuclear magnetic resonance? Scanning electron microscopy and infrared analysis / J. Lobartini, K. Tan // *Soil Science Society Amer. J.* – 1988. – V. 52. – P. 125-130.
32. Alekseev I., Abakumov E.  $^{13}\text{C}$ -NMR spectroscopy of humic substances isolated from the agricultural soils of Puchuncavi (El Melón and Puchuncavi areas), central Chile / I. Alekseev, E. Abakumov // *Soil & Water Research*. – 2020. – P. 1-8
33. Алексеева Н.К., Евграфова С.Ю., Децура А.Е., Гузева А.В. Метелова М.К., Федорова И.В. Микробная доступность органического вещества в донных отложениях арктических озер: лабораторный инкубационный эксперимент / Н.К. Алексеева, С.Ю. Евграфова, А.Е. Децура и др. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2021. – Т. 67. – № 1. – С. 100-121.
34. Гришина Л.А. Гумусообразование и гумусное состояние почв / Л.А. Гришина. – М., 1986. – 245 с.
35. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л.Н. Александрова. – Л.: Наука, 1980. – 288 с.
36. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / А.И. Попов. – СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2004. – 248 с.

---

### *Сведения об авторах*

---

**Алина Валерьевна Гузева**, 1993 г.р., окончила в 2017 г. магистратуру СПбГУ по специальности «геоэкологический мониторинг», является лаборантом Научного центра изучения Арктики (Салехард, Россия), а также младшим научным сотрудником Института озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН (Санкт-Петербург, Россия). Сфера научных интересов: загрязнение донных отложений озер, геохимия гуминовых веществ в озерных экосистемах, озера полярных регионов.

**Никита Эдуардович Демидов**, 1983 г.р., получил степень кандидата геолого-минералогических наук в 2011 г. С 2023 г. является ведущим научным сотрудником Научного центра изучения Арктики (Салехард, Россия). Сфера научных интересов: геокриологические условия Арктики и Антарктики.

**Артем Евгеньевич Лапенков**, 1995 г.р., является младшим научным сотрудником Института озераведения РАН – СПб ФИЦ РАН (Санкт-Петербург, Россия). В 2016 году прошел курсы и получил повышение квалификации по управлению рисками в прибрежной зоне. В 2018 году закончил океанологический факультет Российского государственного гидрометеорологического университета по специальности «прикладная гидрометеорология» и получил степень магистра. Сфера научных интересов: донные отложения озер, форелевые хозяйства, Ладожское озеро.

---

### *Участие авторов*

---

Гузева А.В. – сбор и обработка полевых материалов, статистическая обработка данных и их интерпретация, подготовка текста статьи;

Демидов Н.Э. – организация и участие в полевых работах, подготовка текста статьи;

Лапенков А.Е. - участие в полевых работах, подготовка текста статьи.

Статья поступила в редакцию 02.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 2, 2023, accepted for publication on December 7, 2023.



**ЭКОЛОГИЯ**

---

## ЭКОЛОГИЯ

Научное сообщение

УДК 502.05

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.008

### **РЕЗОЛЮЦИЯ ПО КРУГЛОМУ СТОЛУ «ОЗЕЛЕНЕНИЕ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ» В РАМКАХ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕРЗЛОТНЫЕ ПОЧВЫ В АНТРОПОЦЕНЕ»\***

*Владислав Сергеевич Исаев<sup>1</sup>, Евгения Николаевна Моргун<sup>1</sup>, Евгений Васильевич Абакумов<sup>2</sup>, Александр Анатольевич Егоров<sup>3</sup>, Артемий Юрьевич Антипов<sup>1</sup>, Екатерина Сергеевна Каширина<sup>4</sup>, Михаил Николаевич Окоэтэпто<sup>5</sup>, Глеб Михайлович Кукуручкин<sup>6</sup>, Артём Сергеевич Попов<sup>7</sup>, Сяoley Ли<sup>8</sup>, Тимур Ильгизович Низамутдинов<sup>2</sup>, Валерий Александрович Кибенко<sup>1</sup>, Дмитрий Алексеевич Лукьяненко<sup>9</sup>, Марина Владимировна Авдащенко<sup>10</sup>, Салават Шиникалиевич Булекешев<sup>11</sup>*

<sup>1</sup>Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Институт лесоведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Севастопольский филиал Московского государственного университета, Севастополь, Россия

<sup>5</sup>Община коренных малочисленных народов Севера «Илеби», п. Сёяха, Ямальский район, Россия

<sup>6</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>7</sup>Уральский лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

<sup>8</sup>Московский государственный университет, Шэньчэнь, Китай

<sup>9</sup>Администрация г. Лабытнанги, Лабытнанги, Россия

<sup>10</sup>Администрация г. Салехарда, Салехард, Россия

<sup>11</sup>Окружное автономное учреждение «Леса Ямала», Салехард, Россия

<sup>1</sup>tpomed@rambler.ru VSIsaev@yanao.ru

<sup>1</sup>morgun148@gmail.com

<sup>2</sup>e\_abakumov@mail.ru

<sup>3</sup>egorovfta@yandex.ru

<sup>1</sup>artem.antipov@gmail.com

<sup>4</sup>E\_katerina.05@mail.ru

<sup>6</sup>Lesnik72@mail.ru

<sup>7</sup>popovas@m.usfeu.ru

<sup>8</sup>95529084@qq.com

<sup>2</sup>timur\_nizam@mail.ru

<sup>1</sup>v.a.kibenko@ya.ru

**Аннотация.** В статье представлена резолюция по круглому столу «Озеленение городских пространств в условиях Арктики» в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене», прошедшей 21 августа 2023 г. в г. Салехарде. Одной из приоритетных задач мероприятия стала необходимость при благоустройстве населенных пунктов Ямало-Ненецкого автономного округа признать важность их научно-обоснованного озеленения с учетом региональной специфики.

**Ключевые слова:** озеленение Арктики, биологическое разнообразие, интродуценты, агротехники выращивания, полярное земледелие, этноботаника, Арктическая зона.

**Цитирование:** Резолюция по круглому столу «Озеленение городских пространств в условиях Арктики» в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене» / В.С. Исаев, Е.Н. Моргун, Е.В. Абакумов, А.А. Егоров, А.Ю. Антипов, Е.С. Каширина, М.Н. Окоэтто, Г.М. Кукуричкин, А.С. Попов, Сяолей Ли, Т.И. Низамутдинов, В.А. Кибенко, Д.А. Лукьяненко, М.В. Авдащенко, С.Ш. Булекешев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 122–129. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.008

Science communication

**RESOLUTION ON THE ROUND TABLE «GREENING OF URBAN SPACES IN THE ARCTIC» WITHIN THE FRAMEWORK OF THE ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «FROZEN SOILS IN THE ANTHROPOCENE»\***

***Vladislav S. Isaev<sup>1</sup>, Evgenia N. Morgun<sup>1</sup>, Evgeniy V. Abakumov<sup>2</sup>, Alexander A. Egorov<sup>3</sup>, Artemiy Yu. Antipov<sup>1</sup>, Ekaterina S. Kashirina<sup>4</sup>, Mikhail N. Okotetto<sup>5</sup>, Gleb M. Kukurichkin<sup>6</sup>, Artem S. Popov<sup>7</sup>, Xiaolei Li<sup>8</sup>, Timur I. Nizamutdinov<sup>2</sup>, Valery A. Kibenko<sup>1</sup>, Dmitry A. Lukyanenko<sup>9</sup>, Marina V. Avdashchenko<sup>10</sup>, Salavat Sh. Bulekeshev<sup>11</sup>***

<sup>1</sup>*Scientific Center for Arctic Studies, Salekhard, Russia*

<sup>2</sup>*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Forestry RAS, St. Petersburg, Russia*

<sup>4</sup>*Sevastopol branch of Moscow State University, Sevastopol, Russia*

<sup>5</sup>*Community of indigenous peoples of the North “Ilepts”, Soyakha settlement, Yamal district, Russia*

<sup>6</sup>*Surgut State University, Surgut, Russia*

<sup>7</sup>*Ural Forestry University, Ekaterinburg, Russia*

<sup>8</sup>*Moscow State University, Shenchen, China*

<sup>9</sup>*Administration of Labytnangi, Labytnangi, Russia*

<sup>10</sup>*Administration of Salekhard, Salekhard, Russia*

<sup>11</sup>*District Autonomous Institution “Yamal Forests”, Salekhard, Russia*

<sup>1</sup>*morgun148@gmail.com*

<sup>2</sup>*e\_abakumov@mail.ru*

<sup>3</sup>*egorovfta@yandex.ru*

<sup>1</sup>*artem.antipov@gmail.com*

<sup>4</sup>*E\_katerina.05@mail.ru*

<sup>6</sup>*Lesnik72@mail.ru*

<sup>7</sup>*popovas@m.usfeu.ru*

<sup>8</sup>*95529084@qq.com*

<sup>2</sup>*timur\_nizam@mail.ru*

<sup>1</sup>*v.a.kibenko@ya.ru*

**Annotation.** The article presents a resolution on the round table “Greening of urban spaces in the Arctic” within the framework of the All-Russian scientific and practical conference “Frozen soils in the Anthropocene”, held on August 21, 2023 in Salekhard. One of the priority objectives of the event was the need to recognize the importance of their science-based landscaping, taking into account regional specifics, when improving settlements of the Yamalo-Nenets Autonomous District.

**Keywords:** greening of the Arctic, biological diversity, introduced species, agricultural cultivation techniques, polar farming, ethnobotany, Arctic zone.

**Citation:** Resolution on the round table “Greening of urban spaces in the Arctic” within the framework of the All-Russian scientific and practical conference “Frozen soils in the Anthropocene” / V.S. Isaev, E.N. Morgun, E.V. Abakumov, A.A. Egorov, A.Yu. Antipov, E.S. Kashirina, M.N. Okotetto, G.M. Kukurichkin, A.S. Popov, Li Xiaolei, T.I. Nizamutdinov, V.A. Kibenko, D.A. Lukyanenko, M.V. Avdashchenko, S.Sh. Bulekeshev // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (121). No. 4. P. 122–129. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.008.

20–27 августа 2023 г. в городе Салехарде Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) состоялась масштабная Всероссийская научно-практическая конференция «Мерзлотные почвы в антропоцене», в рамках которой был впервые проведён практико-ориентированный круглый стол «Озеленение городских пространств в условиях Арктики». Мероприятие в таком инновационном формате было инициировано департаментом внешних связей ЯНАО, организовано и проведено при участии государственного автономного учреждения ЯНАО «Научный центр изучения Арктики».

В работе круглого стола приняли участие более 100 известных ученых-почвоведов, дендрологов и ботаников из ведущих научных учреждений Российской Федерации, Израиля и Китая, представители общин коренных малочисленных народов Севера, сотрудники департамента внешних связей ЯНАО, департамента природных ресурсов и экологии ЯНАО, департамента агропромышленного комплекса ЯНАО, представители администраций г. Салехарда, г. Лабытнанги, пгт. Харп, сотрудники ОАУ «Леса Ямала», ООО «Ямальский картофель», ООО «Приполярная», МСП «Мужевское», агрофирмы «Толькинская», сотрудники лесничеств из разных муниципалитетов округа, огородники-любители и заинтересованные жители региона.

Одной из приоритетных задач круглого стола стала острая необходимость при благоустройстве населенных пунктов Ямало-Ненецкого автономного округа признать важность их научно-обоснованного озеленения

с учетом региональной специфики. В ходе обсуждения была отмечена необходимость в формировании рекомендаций по разработке концептуальных основ озеленения населенных пунктов ЯНАО с учетом специфики климата и почв в условиях Крайнего Севера, в целях определения наиболее устойчивых видов саженцев древесной растительности и сортов декоративной многолетней травянистой растительности, а также рекомендаций по использованию удобрений и системы обработки почвы для поддержания здорового вида зеленых насаждений.

На круглом столе было заслушано и всесторонне обсуждено 12 докладов: «О результатах проведения НИР «Многолетние исследования по разработке ассортимента растений для озеленения населенных пунктов ЯНАО»; «Результаты озеленения г. Салехарда и других населенных пунктов ЯНАО (по состоянию на 2023 год)»; «Флора урбанизированных экосистем ЯНАО»; «Растения и город: взаимодействие на примере городов Арктики»; «Особенности формирования зелёных каркасов северных городов на примере г. Салехарда, г. Лабытнанги и пгт. Харп»; «Задачи прикладной ботаники в урбанизированных экосистемах Югры»; «Арктическое земледелие и озеленение (на примере сеяхинской тундры)»; «Особенности ведения частного сельского хозяйства в Ямало-Ненецком автономном округе»; «О результатах работ по озеленению территории города Салехарда»; «К вопросу озеленения территории (в т. ч. высадке деревьев) вдоль гостевого маршрута до пгт Харп»; «Политика муниципального правительства Шэньчэня в области охраны мангровых лесов». В ряде выступлений были показаны результаты действующих международных проектов и рассмотрены перспективы развития международного сотрудничества.

В целом, участники круглого стола, понимая важность научно обоснованного озеленения населенных пунктов Арктики и Субарктики в условиях глобальных изменений природной среды и климата, наиболее выраженных именно в высоких широтах, рекомендуют:

Органам государственной власти ЯНАО:

1. Направить усилия по созданию питомников для обеспечения проектов по озеленению населенных пунктов: создать рабочую группу, выделить финансирование, оказать поддержку инициативным растениеводам.
2. Осуществлять проектирование, создание, поддержание и развитие этноботанических коллекций и экспозиций с учетом региональной специфики.
3. Рассмотреть предложения по организации питомников в лучших условиях, массово выращивая посадочный материал в г. Ноябрьске (как наиболее теплообеспеченном месте округа), ограниченный ассортимент – в более северных городах. Использовать уже полученный опыт закладки экспериментальных площадок, питомников и опыт растениеводов-любителей.

4. Обратить внимание на подготовку специалистов-озеленителей для департаментов и комитетов, занимающихся благоустройством населенных пунктов.

5. Создать социальный проект «Грант на посадочный материал» для местного населения.

Департаменту внешних связей ЯНАО:

1. Учредить в структуре ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» в секторе биоразнообразия подразделение ботанической и этноботанической направленности, привлечь к работе по озеленению ЯНАО специалистов в области интродукции, ботаники, агрономии, этноботаники и рационального природопользования на основе региональных традиций КМНС ЯНАО.

2. Кейсы от муниципалитетов по озеленению городских и сельских пространств включить в молодежную образовательную платформу.

Городским службам в ЯНАО:

1. Заключать договоры о намерениях на уход за высаженными растениями и проводить на их основе планирование бюджета. Рекомендованный срок ухода – не менее 3 лет.

2. Использовать единый научно-обоснованный ассортимент для озеленения населенных мест ЯНАО, который разработан учеными-растениеводами и рекомендован для всего округа.

3. Продолжить работу по разработке устойчивого и эффективного ассортимента кустарников и травянистых растений для различных природно-климатических условий ЯНАО.

4. Посадки растений по озеленению проводить в конце августа – сентябре. Этот опыт для территории ЯНАО является обоснованным, т. к. успешности весенних посадок в июне мешают слабо оттаявшие мерзлотные почвы и недостаточный уход (полив) в течение вегетационного периода.

5. Обратить внимание на инвазионную активность используемых при озеленении населенных пунктов интродуцированных растений. При разработке устойчивого ассортимента деревьев, кустарников, травянистых растений учитывать инвазионную активность растений в соседних регионах и регионах со сходными природно-климатическими условиями.

6. Использовать для озеленения концепцию городских огородов.

7. Привлекать к работам специалистов по озеленению с соответствующим профильным образованием.

Коммунальным службам и строительным организациям в ЯНАО:

1. При создании зеленых насаждений обратить внимание на подготовку посадочных мест для древесных растений, почвенного покрова под газоны, обеспечить их достаточным поливом во время посадки и в дальнейших уходах (1-2 года для лиственных растений и газонов, 2-3 года для

хвойных). В противном случае недостаточная подготовка почвы и отсутствие полива приводят часто к выпадению растений.

Администрациям г. Салехарда, г. Лабытнанги:

1. Организовать конкурс в области колористических решений, ландшафтного дизайна и архитектуры с участием экспертов и профессионалов.

2. Поддерживать и развивать инновационные идеи в сфере озеленения.

3. Осуществить внедрение системы мониторинга состояния почв, связанной с ГИС проектом для более эффективного ухода за зелеными насаждениями и проводить регулярный мониторинг и анализ данных для выявления проблем и корректировки ухода.

4. Создать специализированные питомники для разведения и выращивания посадочного материала, соответствующего местным условиям.

5. Отдавать приоритет в озеленении использованию видов местной флоры, которая наиболее адаптирована к природно-климатическим условиям. Положительным примером такого подхода является оформление придомовых территорий «в стиле лесотундры» – высадка древесных растений, формирование кустарникового и мохово-лишайникового ярусов.

6. Использовать ландшафтные особенности по применению местного полярно-уральского камня, а также формированию каменных малых архитектурных форм, например, альпийских горок.

7. Использовать концепцию «белых городов»: при формировании зеленых насаждений учитывать, что зима (снежный покров) занимает большую часть года. Рекомендуется оценивать зеленые насаждения для разных сезонов.

Администрации г. Салехарда:

1. Назвать один из скверов в г. Салехарде «Сквер имени Виктора Петровича Бурко».

2. Продолжить работу с ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» по озеленению, в том числе в рамках проекта по озеленению набережной р. Преображенки.

ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» и научному сообществу:

1. Провести научные исследования по озеленению городов и предоставить в муниципальные образования ЯНАО рекомендации, которые должны включать мероприятия по правильному содержанию зеленых насаждений (при отсутствии регулярного полива и скудности почвы; дополнительные меры по защите зеленых насаждений от солнечных ожогов (таких как укрытие, обработка препаратом «Пуршат-О»); меры борьбы с повреждениями зеленых насаждений при зимнем содержании на улично-дорожной сети города; виды зеленых насаждений для озеленения в

условиях мерзлоты разного функционального назначения, включающие ассортимент растений, их возраст, размер (высота) и происхождение (из каких питомников), рекомендации по уходу и содержанию; ассортимент растений для живой изгороди, включающий местные и интродуцированные виды; виды удобрений при посадке и содержании, программу ухода за зелеными насаждениями.

2. Применять бионический принцип для расширения возможностей искусственного озеленения.

3. Сформировать научно обоснованный план (концепцию) по озеленению ЯНАО.

4. Разработать стратегию по предотвращению новых биологических инвазий, а также для управления районами, важными с точки зрения разнообразия растений, для которых существует опасность внедрения инвазий.

5. Разработать и внедрить геоинформационную систему по учету зеленых насаждений в ЯНАО.

6. По возможности включаться в работу Общественных комиссий по формированию комфортной городской среды по вопросам озеленения.

7. Возобновить научное сопровождение проекта по озеленению набережной р. Преображенки.

8. Для сохранения исчезающей информации необходимо как можно скорее организовывать сбор оригинальных этноботанических данных в разных районах ЯНАО, чтобы они не были утрачены навсегда.

9. Для оценки потребностей в озеленении провести социологические опросы населения для выявления потребностей в формировании зеленых зон и определения функций зеленых зон.

10. Разработать для муниципальных образований наглядные методические материалы, учитывающие типичные ошибки при озеленении городских пространств.

11. Разработать курсы повышения квалификации по подготовке ландшафтных архитекторов. Для чтения курсов привлечь специалистов.

12. Поблагодарить организаторов конференции за возможность обсудить данную проблематику на круглом столе.

*Примечание\*:* Данная резолюция была зачитана, обсуждалась и была одобрена на закрытии Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене» 27 августа 2023 года.

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа  
Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District

№ 4 (121) 2023

В журнале публикуются исследования, посвященные вопросам развития Арктического региона планеты. Для нас важно представить комплексный взгляд на процессы, происходящие в этом регионе, поэтому принимаются рукописи, освещающие проблематику с разных точек зрения — исторической, экономической, экологической, биологической, социокультурной.

Особое внимание уделяется исследованиям в сфере мерзотоведения, криологии Земли, экологии и геоэкологии, истории и образа жизни коренных малочисленных народов Севера, адаптации современного человека к условиям Арктики.

Журнал ориентирован на исследователей, работников органов государственного и муниципального управления, аспирантов и студентов университетов стран Арктики.

Журнал является рецензируемым, индексируется и реферировается в наукометрической базе данных Российского Индекса Научного Цитирования (РИНЦ).

**Сайт журнала:** <http://magazine.arctic89.ru/>

12+

**Свидетельство о регистрации СМИ:** ПИ №ФС77-81250 от 08.06.2021 г.

**Учредитель и издатель:** ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

629008, Россия, Ямало-Ненецкий АО, г. Салехард, ул. Республики, 20, оф. 203,  
тел. 8 (34922) 4-41-32, e-mail: vvp2014@bk.ru

**Подписной индекс:** П6404

Распространяется в печатном виде. Все статьи журнала находятся в открытом доступе (Open Access)

Фото на обложке: Александр Шеин (г. Салехард)

© Государственное автономное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики»

---

Подписано в печать 15.12.2023 г. Дата выхода в свет 18.12.2023 г.

Формат 70x100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,125.

Гарнитура Newton. Бумага Colotech Plus. Тираж 100 экз. Заказ № 355007.

Цена свободная.

Отпечатано в типографии «Золотой тираж» (ООО «Омскбланкиздат»)

г. Омск, ул. Орджоникидзе, 34,

тел. (3812) 212-111

[www.золотойтираж.рф](http://www.золотойтираж.рф)

---