



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПЛОЩАДКИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА «КУМЖА», РАСПОЛОЖЕННОЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ПЕЧОРА

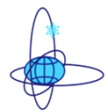
Малкова Галина Владимировна, galina_malk@mail.ru

Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Коростелев Ю.В.,

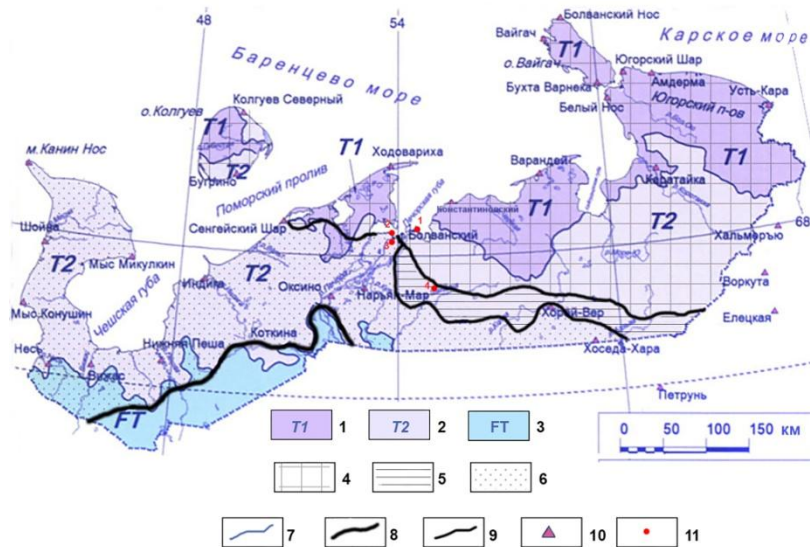
Царев А.М., Давыденко С.Ю., Судакова М.С

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г.Тюмень, РФ

Работа выполнена в институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FWRZ-2021-00012), проект IX.133.1.1. «Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов»..



Природные и геофизиологические зоны

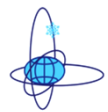


- 1 – типичная тундра; 2 – южная тундра; 3 – лесотундра.
4 – сплошное распространение; 5 – прерывистое распространение;
6 – островное распространение; 7 – границы природных зон и подзон;
8 – южная границы криолитозоны; 9 – границы типов распространения ММП; 10 – метеостанции; 11 – объекты геофизиологического мониторинга
(1- Болванский, 2 – Кашин, 3 – Кумжа, 4 – Шапкина)



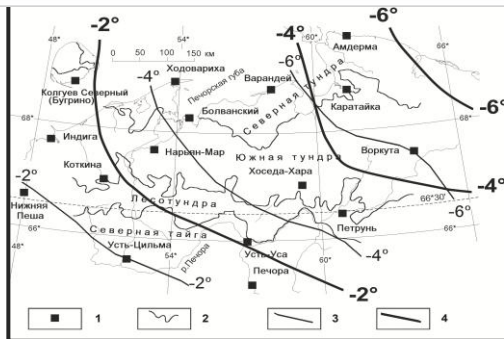
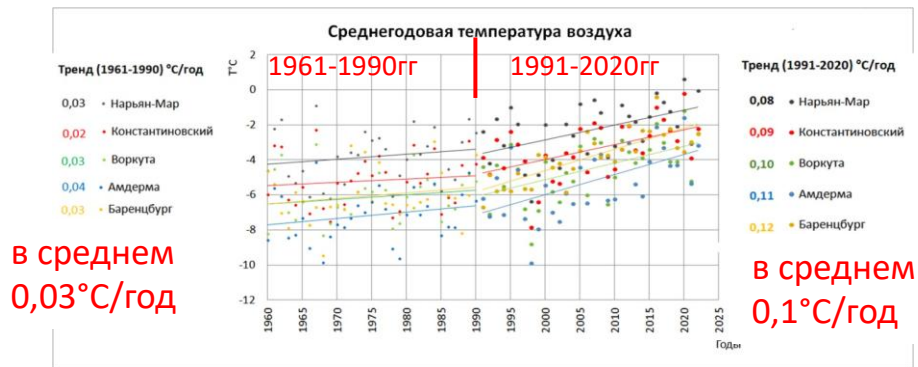
Подавляющее большинство данных о состоянии криолитозоны, а также о ее взаимодействии с объектами инфраструктуры нуждается в обновлении и актуализации, поскольку при потеплении климата отмечается повышение температуры мерзлоты и, как следствие, потеря несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений.

Криолитозона севера ЕТР является наиболее пестрой и наименее устойчивой по сравнению с другими территориями Российской Арктики. В тех же природных и геофизиологических зонах мерзлота здесь является более высокотемпературной, а мощность мерзлых толщ - меньше.



Изменение климатических параметров в криолитозоне ЕТР

Изменение среднегодовой температуры воздуха и трендов потепления



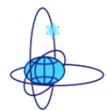
- 1 – метеостанции, 2 – границы природных зон,
3 – изолинии среднегодовой температуры воздуха, период нормы, XX век
4 – изолинии среднегодовой температуры воздуха, XXI век



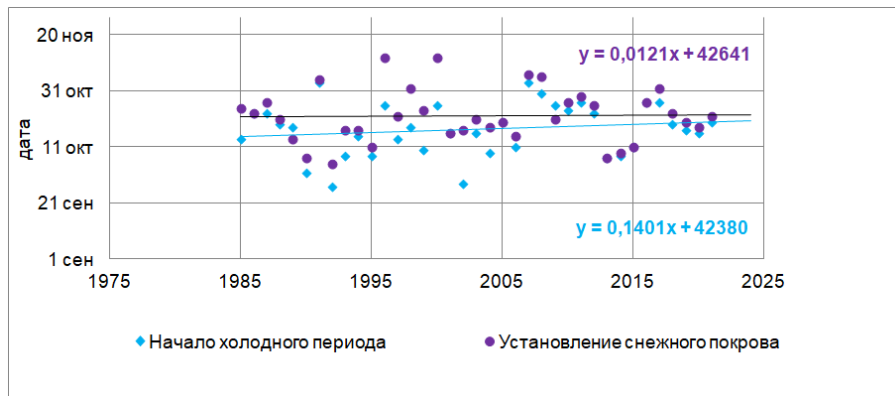
Повышение среднегодовой температуры воздуха (тренд)

- Менее 0,3 °C / 10 лет
- 0,3 ... 0,5 °C / 10 лет
- Более 0,5 °C / 10 лет

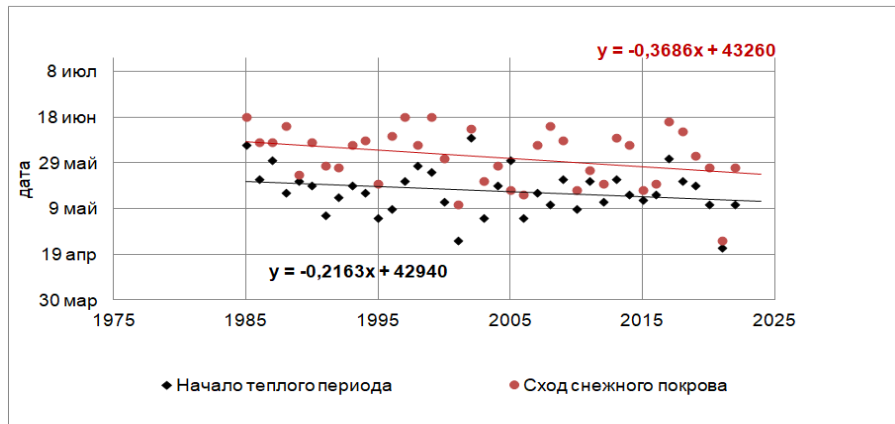




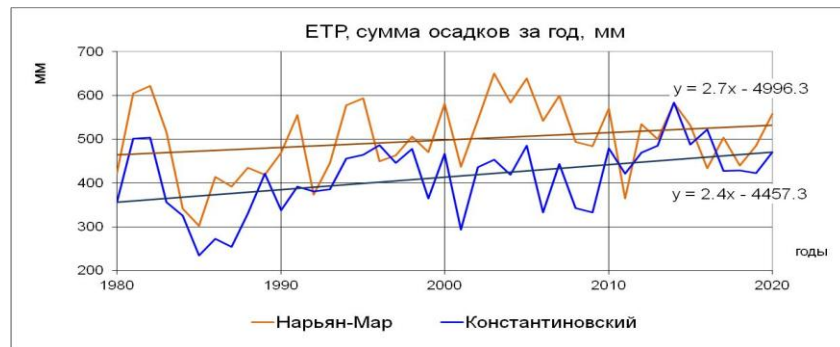
Изменение климатических параметров в криолитозоне ЕТР



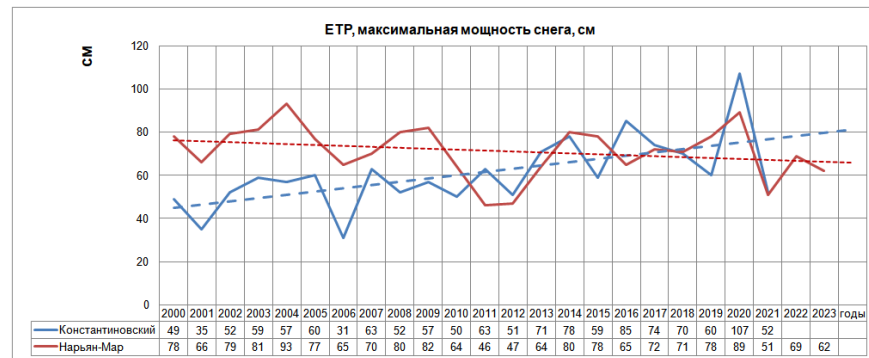
Теплый период за последние 30 лет
увеличился в среднем на 14 дней

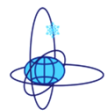


Отмечается увеличения суммы атмосферных осадков в год по
данным метеостанций НАО – на 100 мм за 30 лет.

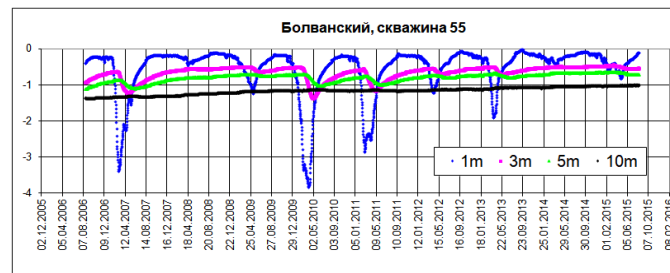
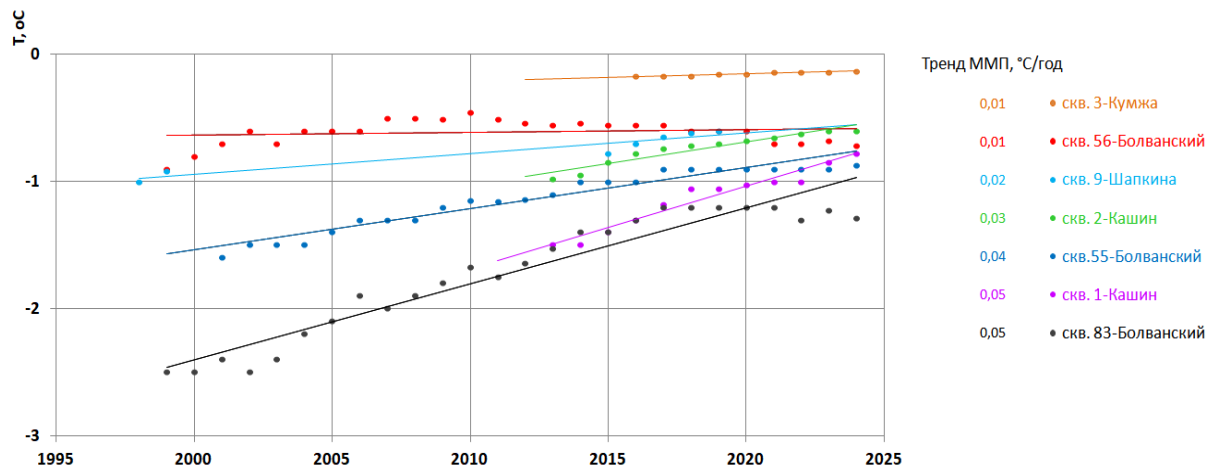


Для прибрежных районов наблюдается заметное повышение
максимальной мощности снега от 40-50 см в начале века,
до 80 см в последние годы.





Тренды среднегодовой температуры пород на объектах мониторинга



В криогенных ландшафтах Европейского севера наблюдаются исключительно положительные тренды среднегодовой температуры ММП от 0,01 до 0,05°C/год, **но они в несколько раз отстают от темпов повышения температуры воздуха**. Наибольшие тренды среднегодовой температуры ММП в естественных ландшафтах характерны для низкотемпературных пород, а наименьшие – для высокотемпературных. В интервале 0...-1°C тренды повышения среднегодовой температуры ММП замедляются, поскольку начинаются фазовые переходы в грунтах, тормозящие процесс растепления.



Изменение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород

Болванский (сплошное распространение ММП)

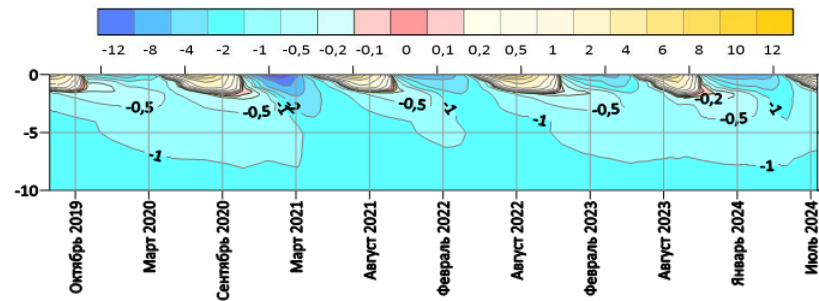
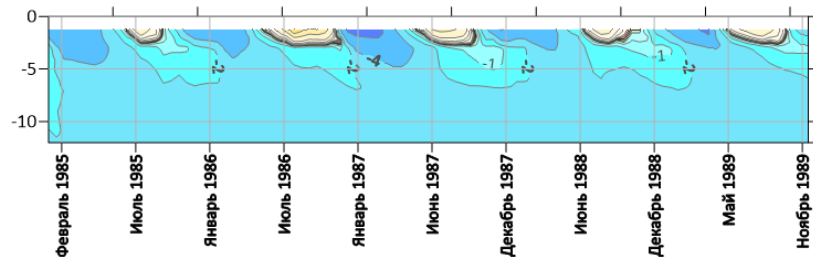
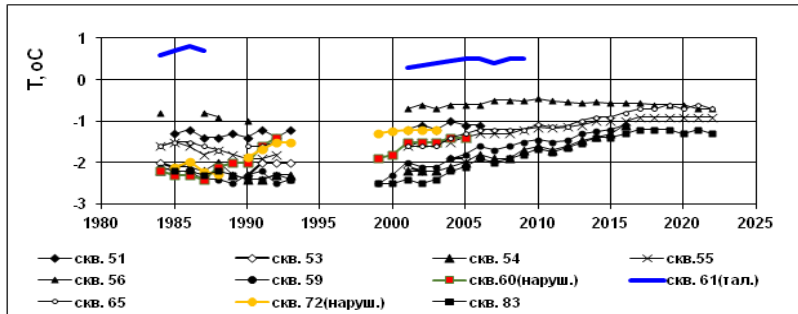


Наблюдательные скважины ИКЗ СО РАН на стационарах Европейского севера (НАО)

№	Координаты	Абс. отг. глубина, м	Литология	Ландшафтные условия	Периоды наблюдений	Температура в начале наблюдений	Температура в 2024 г
Болванский (воющая тундра), сплошное распространение ММП							
0054	68°17'18" N 54°30'15" E	27,5/12	Переслаивание песка, супеси, суглинка	Штгт равнина. Вершина холма, влажная тундра с пятнами медальонами	1983-1993; 1999-2016, затекла	-2,2	-1,0
0055	68°17'23" N 54°30'09" E	24,0/10	Торф - 4 м, ниже суглинок	Штгт равнина. Останец полигонального торфяника	1983-1993; 1999-2024	-1,6	-0,9
0056	68°17'23" N 54°30'21" E	23,0/10	Торф - 2 м, ниже суглинок	Штгт равнина. Останец на бровке оврага, торфяник	1983-1993; 1999-2024	-0,9	-0,6
0059	68°17'15" N 54°29'55" E	30,0/15	Суглинок, супесь с гравием	Штгт равнина. Вершина холма, дрепированная тундра с пятнами медальонами	1983-1993; 1999-2015, разрушена, затекла	-2,3	-1,1
0065	68°17'12" N 54°31'10" E	28,0/12	Переслаивание песка, супеси	Штгт равнина. Пологий склон холма, влажная тундра	1983-1993; 1999-2024	-1,6	-0,6
0083	68°17'07" N 54°28'58" E	30,5/10	Переслаивание супеси, суглинка	IV штгт равнина. Вершина увала, дрепированная тундра	1983-1993; 1999-2024	-2,1	-1,2

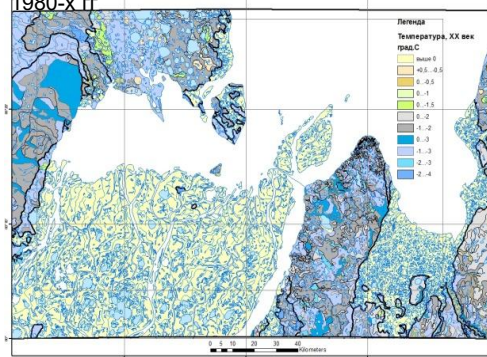


! С 2024 г. наблюдения прекращены в связи с удорожанием доставки на стационар. Скважины законсервированы.

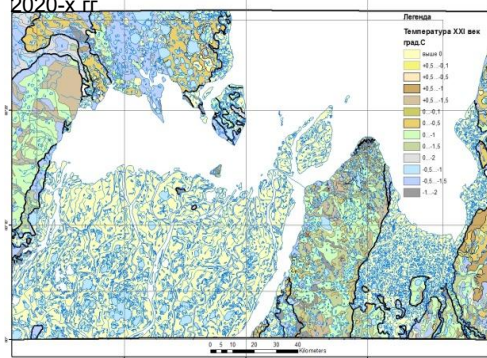


Разрабатываются подходы оценки и картографирования пространственно-временных изменений геоэкологических условий (распространения мерзлых толщ, температуры ММП и трендов ее изменения) на основе текущих данных наблюдений и мониторинга происходящих изменений при потеплении климата

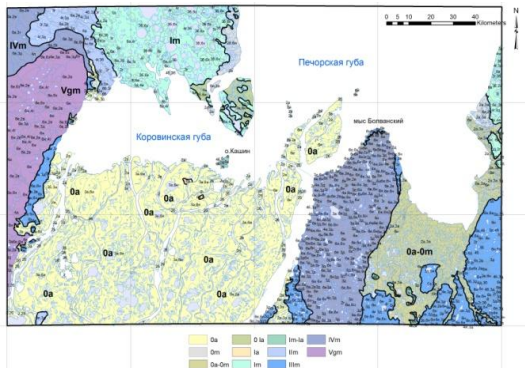
А. Карта среднегодовой температуры ММП в 1980-х гг



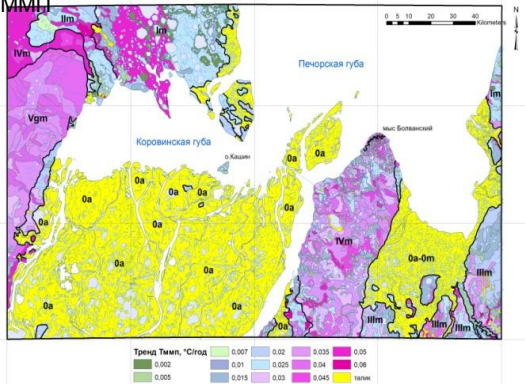
Б. Карта среднегодовой температуры ММП в 2020-х гг



В. Карта типов криогенных ландшафтов (ПТК)



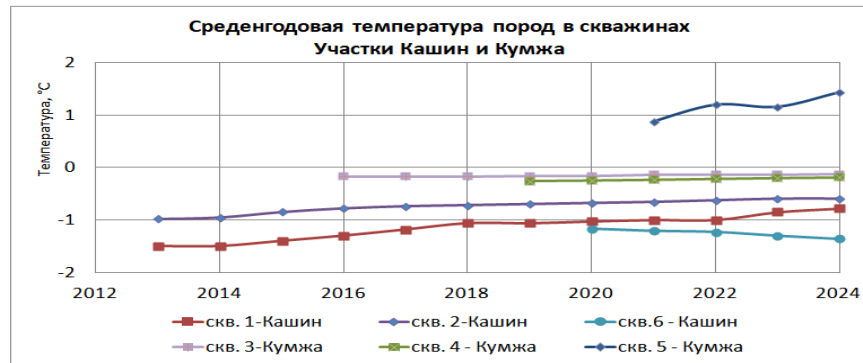
Г. Карта трендов изменения среднегод. температуры ММП





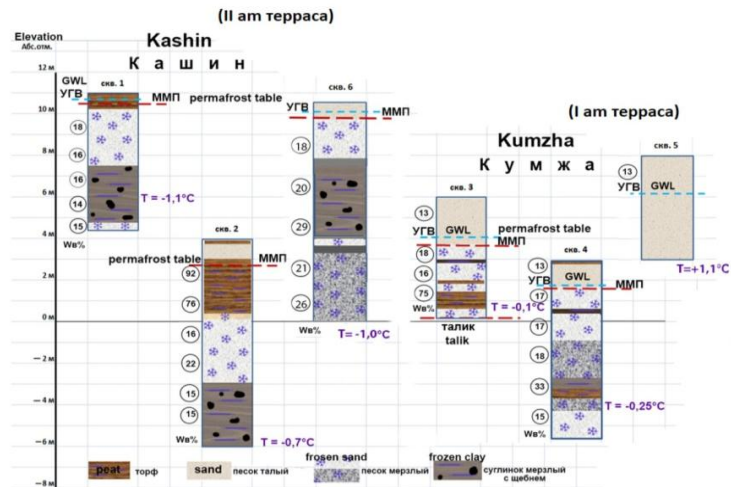
Изменение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород

Кашин + Кумжа (островное распространение ММП)



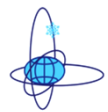
Наблюдательные скважины ПКЗ ТюмНЦ СО РАН на площадках Кашин и Кумжа (НАО).

№	Координаты	Абс. отв./глубина, м	Литология	Ландшафтные условия	Периоды наблюдений	Температура в начале наблюдений	Температура в 2024 г
Кашин (окайм. тундра), островное распространение ММП							
0001k	68°14'36" N 53°51'10" E	11,0/6	Торф. Им, ниже песок с гравием	Плоская вершина остова Им террасы, чередование торфяника и тундры	2012-2024	-1,6	-0,9
0002k	68°14'50" N 53°51'48" E	3,0/10	Песок с гравием	Крайняя часть остова Им террасы, дренированная тундра	2012-2024	-1,0	-0,7
0006k	68°14'32" N 53°51'16" E	11,0/9	Песок с прослойки суглинка и щебня	Крайняя часть остова Им террасы. Плоская ровная полярность полигональная лишайниковая тундра	2019-2024	-1,0	-1,2
Кумжа (окайм. тундра), островное распространение ММП							
0001ku	68°11'38" N 53°47'15" E	7,0/3	Песок с гравием	Плоская вершина остова Им террасы нарушенная полярная тундра	2014-2024	-0	-0
0002ku	68°11'35" N 53°46'51" E	5,0/3	Песок с гравием	Плоская вершина остова Им террасы, лишайниковая тундра	2014-2024	-0	-0
0003ku	68°11'37" N 53°46'47" E	4,0/6	Песок с гравием, прослойки торфа на гл. 4-5 м	Крайняя часть остова Им террасы, лишайниковая тундра	2016-2024	-0,1	-0,1
0004ku	68°12'10" с ш. 53°47'17" в д.	4,0/8	Песок с прослойки торфа на гл. 6-7 м	Дыше обширного понижения на поверхности Им террасы, заболоченное, с фрагментами торфяников	2018-2024	-0,3	-0,3

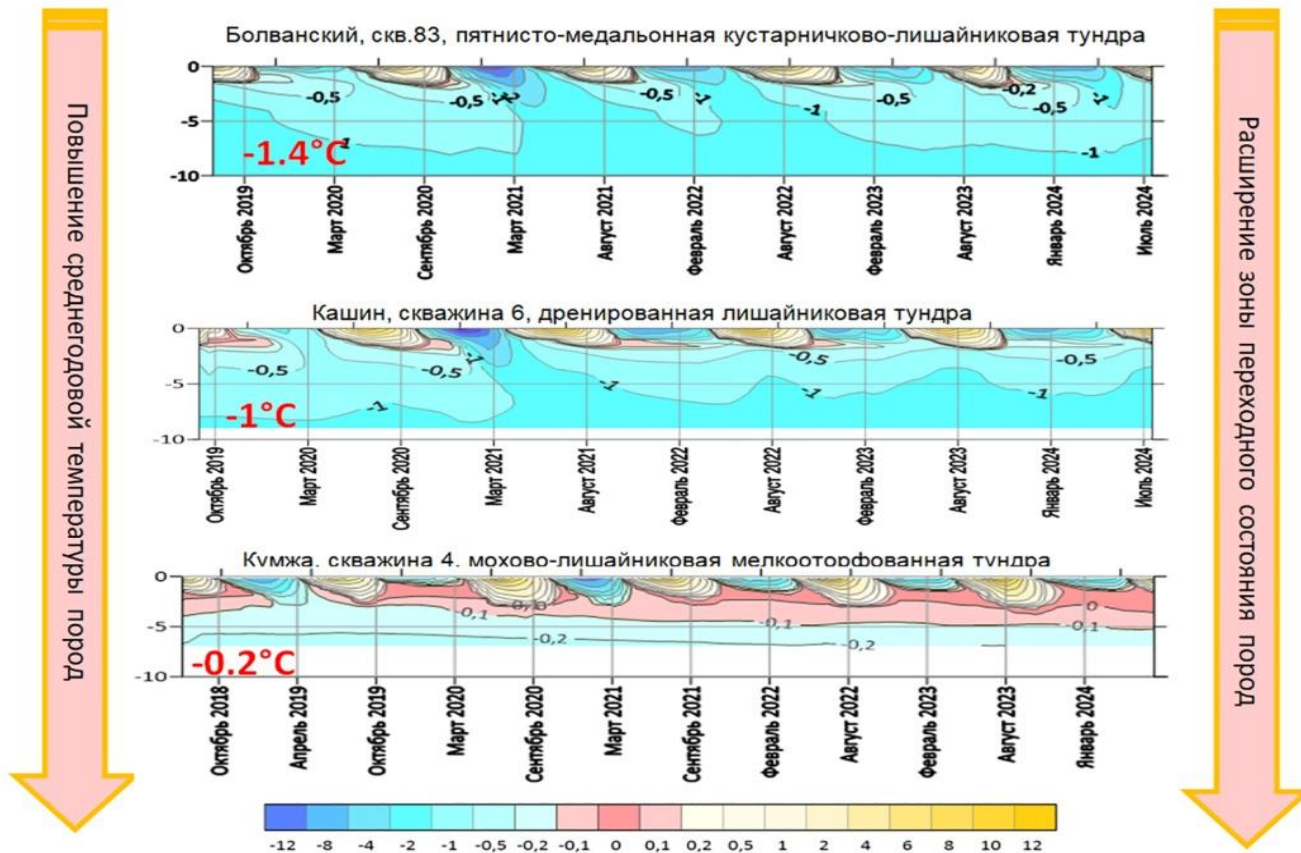


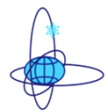
остров Кашин
II ам терраса
а.о. 6 – 12 м



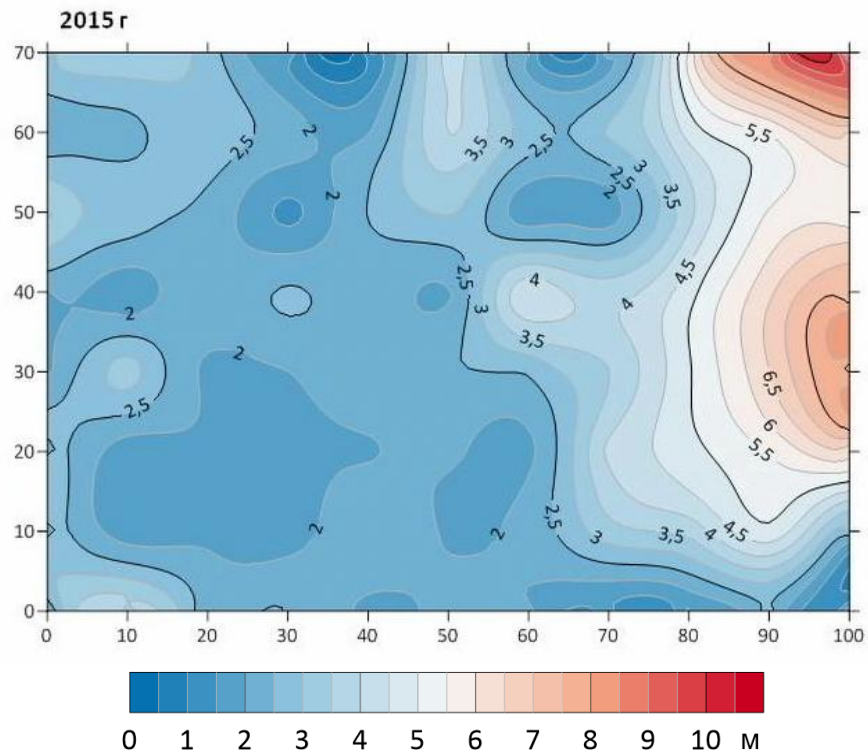


Формировании горизонтов нестабильного (переходного) состояния ММП





Определение залегания кровли мерзлоты



Измерение глубины протаивания
металлическим щупом



Сейсмопрофилирование



Внешний облик площадки,
фотография с дрона

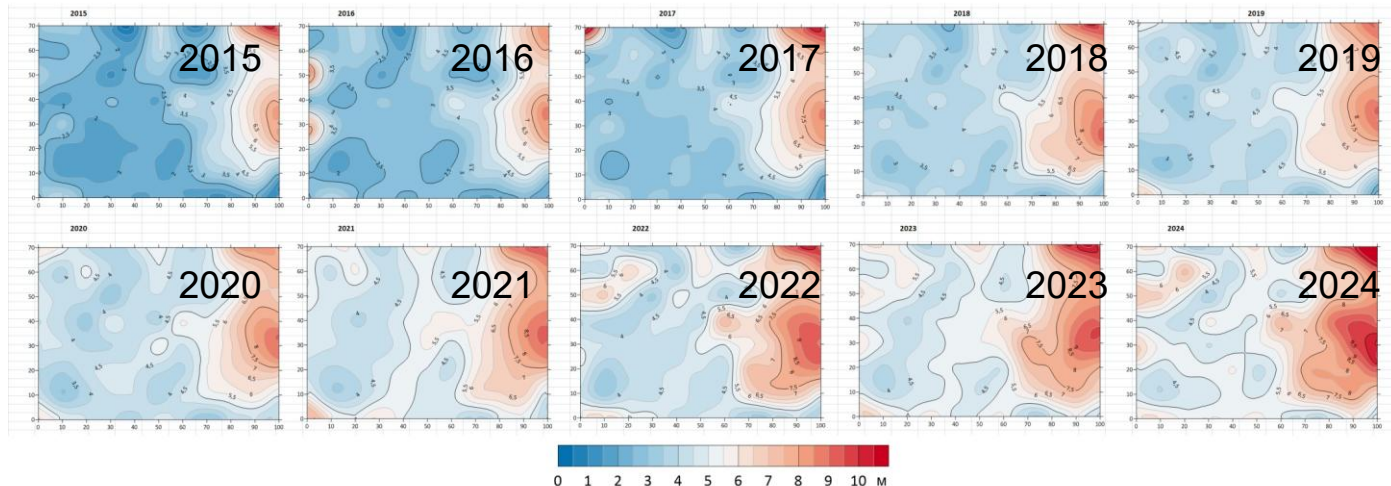


Георадарная съемка



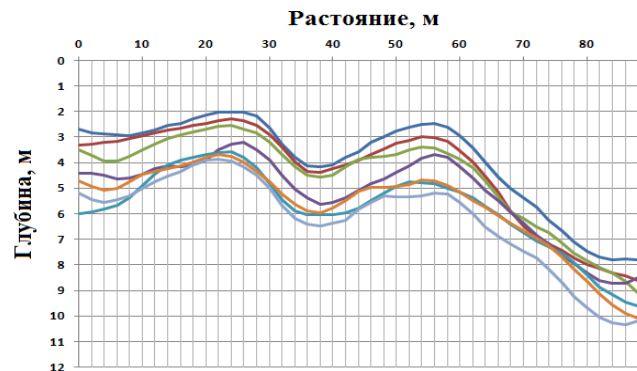


Площадка Кумжа. Глубина кровли мерзлоты по данным георадиолокации за период с 2015 по 2024 гг *)



*) георадиолокационные исследования выполняется по методике непрерывного профилирования с совмещенными приемной и излучающей антеннами, применяется георадар “Зонд-12е” (Radar inc., Рига, Латвия) с антенной типа “бабочка” с центральной частотой в воздухе 300 МГц

Площадка Кумжа. Глубина залегания кровли мерзлоты по профилю Н0...Н10 по данным сейсмопрофилирования**)



**) Сейсмические исследования выполняются методом преломленных волн с помощью продольных и поперечных SH-волн с использованием встречной и нагоняющей системы наблюдений - т.н. методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах (ВСПВ). Используется ударный способ возбуждения сейсмических колебаний. Для регистрации сейсмического сигнала использовалась цифровая сейсмостанция “Эллисс-2” (ООО “Геосигнал”, Москва, РФ)

Средние значения глубины кровли ММП по профилю Н 0...Н10

Год	2015г	2017г	2018г	2019г	2022г	2023г	2024г
Глубина ММП средняя, м	3,9	4,4	4,6	5,2	5,8	6,2	5,7



При проведении прогнозных расчетов в условиях вечной мерзлоты одной из важных задач является определение трехмерного теплового состояния грунтов до строительства и в процессе эксплуатации сооружения.

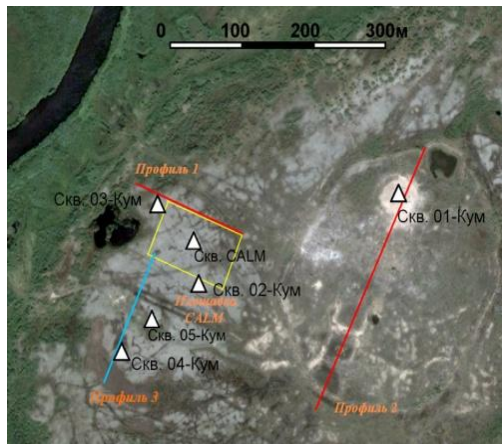
Эту задачу позволяет решить **программный продукт «Frost 3D Термо»**, с помощью которого выполняется моделирование процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учетом влияния внешних тепловых воздействий.

Программа позволяет создавать 3D геологическую модель грунтов любой сложности, после чего выполнять расчет температурного режима грунтов с учетом влияния зданий и сооружений, в том числе протяженных линейных объектов.

В качестве полигона для создания цифрового двойника была выбрана **площадка геокриологического мониторинга «Кумжа»**, расположенная на Европейском севере в области островного распространения мерзлоты (дельта р.Печора).

Быстрый и удобный доступ к информации, автоматический анализ, численное моделирование и трехмерную визуализацию текущего и прогнозного термического состояния грунтов позволяет реализовать цифровой геокриологический двойник, созданный в программе Frost 3D. Цифровой двойник площадки «Кумжа» сочетает результаты многолетних наблюдений и инновационные технологии для управления рисками в условиях деградации мерзлоты.

Местоположение площадки Кумжа и фактический материал (скважины, профили)



Размер полигона 600x600 м

Размер площадки 100x70 м

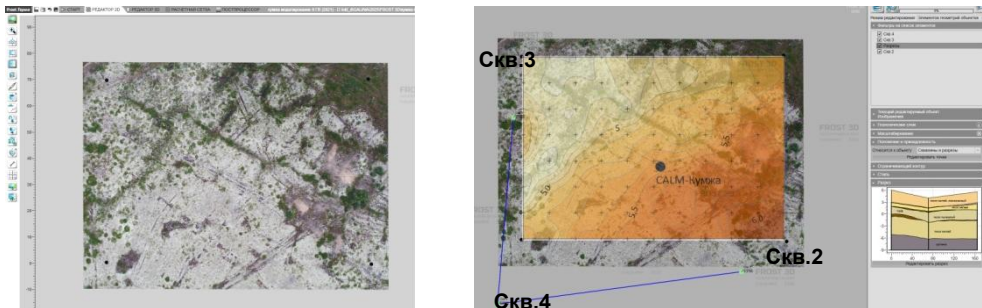
Абсолютные отм. поверхности 4...6 м

Глубина изучения разреза около 10 м

Полевые методы:

- бурение, описание и опробование пород, топография, мониторинг термического состояния пород (6 скважин), измерение глубины протаивания щупом (88 точек), детальная съемка с квадрокоптера, ландшафтные описания;
- Геофизический мониторинг по опорным точкам и профилям (сейсмопрофилирование, георадиолокационная съемка)

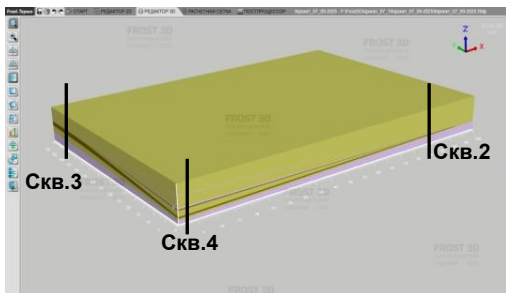
Построение 2D модели площадки Кумжа в программе «Frost 3D Термо»



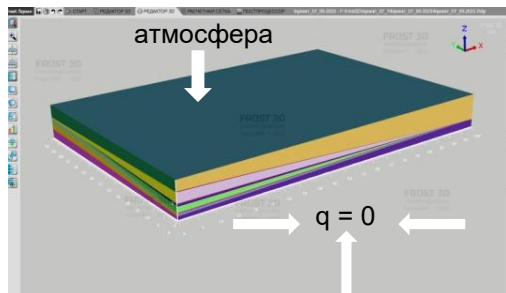
- Климатические данные с учетом тренда изменения или выбранной периодичности
- Теплофизические свойства грунтов и строительных материалов.
- Граничные условия.
- Начальное распределение температуры в грунте.

Создание 3D модели площадки Кумжа в программе «Frost 3D Термо»

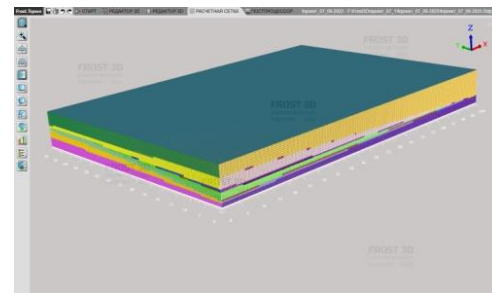
А. Выделение ИГЭ и термометрия по скважинам



Б. Задание граничных условий границ 3D-модели

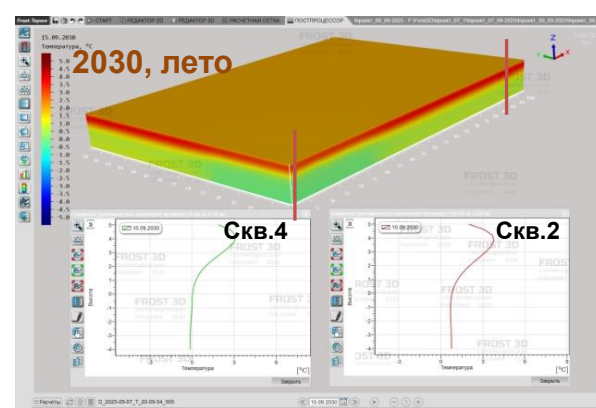
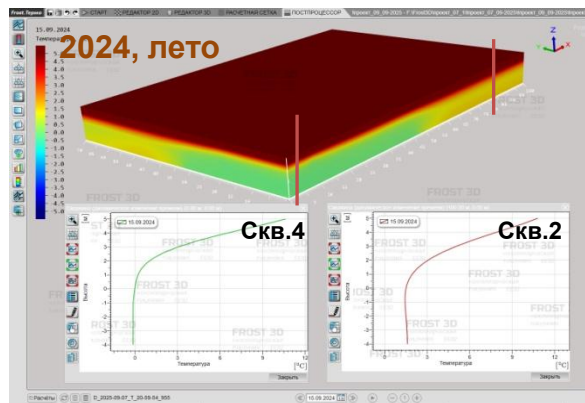
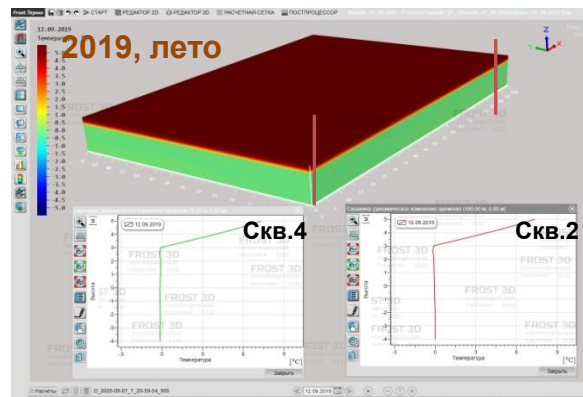
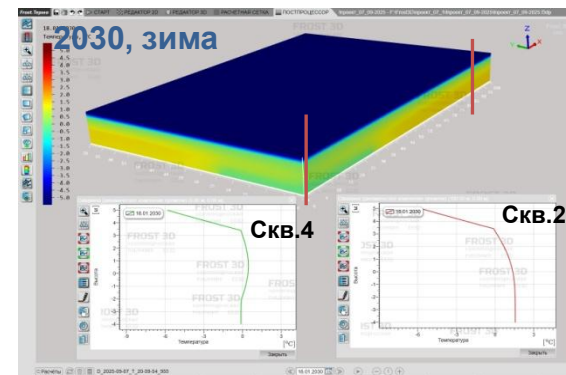
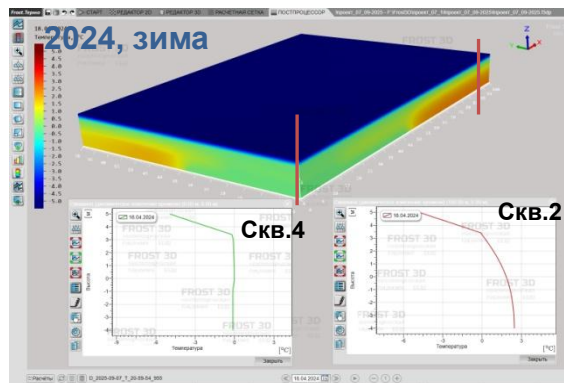
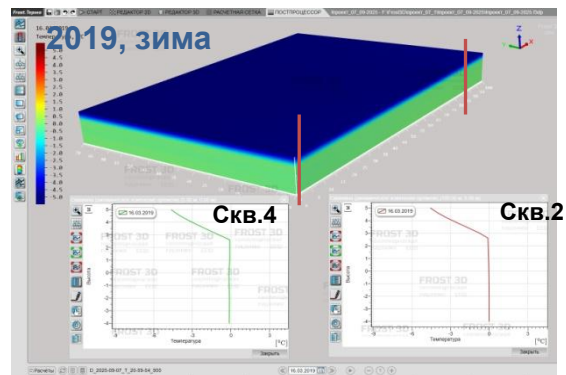


В. Построение расчетной сетки



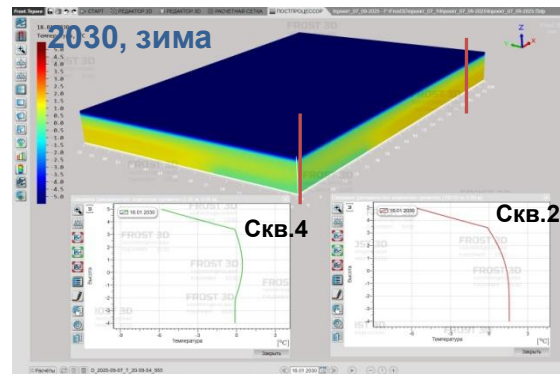
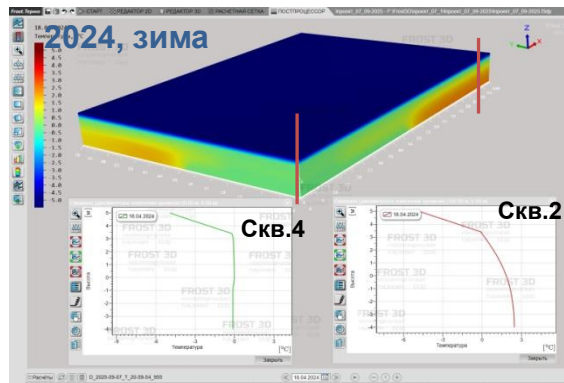
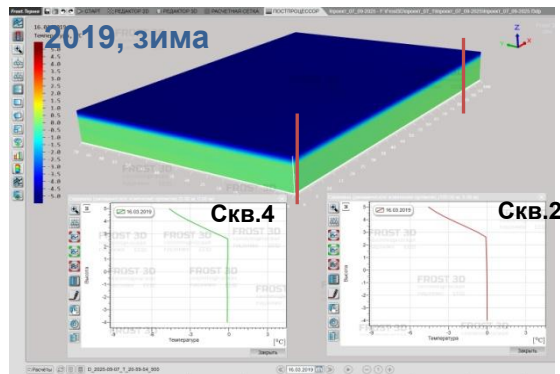
Модельные расчеты проведены для периода с 2019 - 2030 гг, т.е. охватывают 6 лет собственных наблюдений и 5 лет прогнозных изменений

Площадка Кумжа, пространственно-временная 3D-модель температурного режима пород

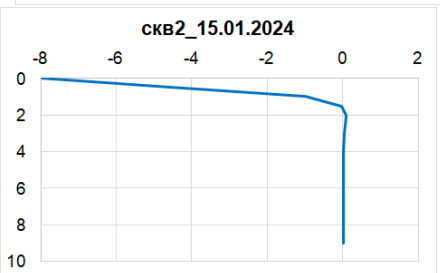
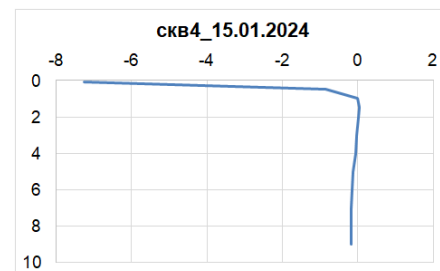
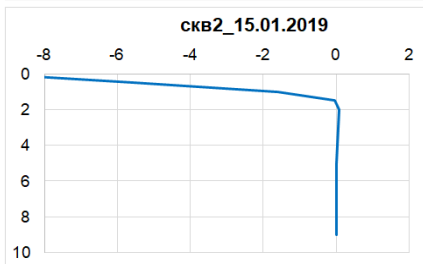
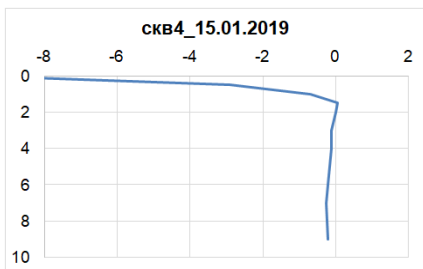


- моделирование, прогноз и визуализация трехмерных полей пространственно-временного изменения температуры пород
- моделирование и трехмерная визуализация процесса сезонного протаивания и промерзания пород
- моделирование и визуализация времени формирования и мощности несквозных таликов

Верификация пространственно-временной 3D-модели температурного режима пород



Модель



Измерение в скважине

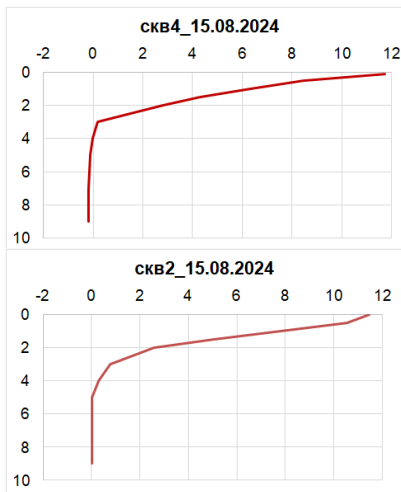
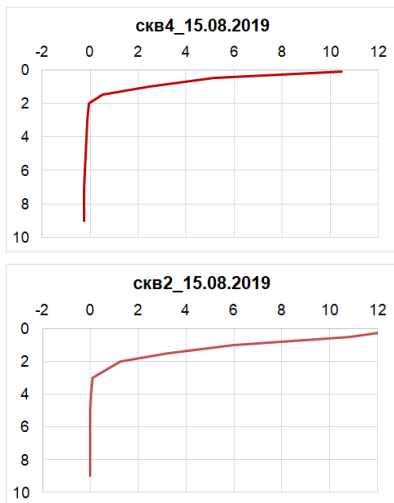
Зимний период.

Хорошая сходимость результатов моделирования и непосредственных изменений.

- С 2019 по 2024 г глубина промерзания сократилась в обеих скважинах.
- С 2019 по 2024 г температура ММП глубже деятельного слоя в скв.4 повысилась на $0,1^{\circ}\text{C}$, но осталась отрицательной, а в скв.2 колеблется в интервале $0 \dots +0,1^{\circ}\text{C}$.
- К 2030 г по модельным расчетам в скв.4 сформируется непромерзающий зимой горизонт в интервале глубин 2-7 м от поверхности.
- К 2030 г по модельным расчетам в скв.2 в пределах изученного разреза мерзлота отсутствует, а температура пород продолжит повышаться.

Верификация пространственно-временной 3D-модели температурного режима пород

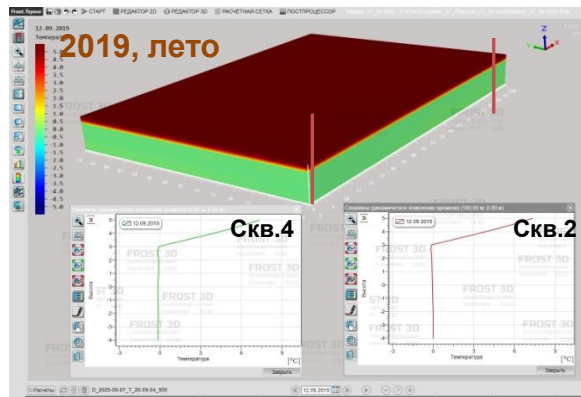
Измерение в скважине



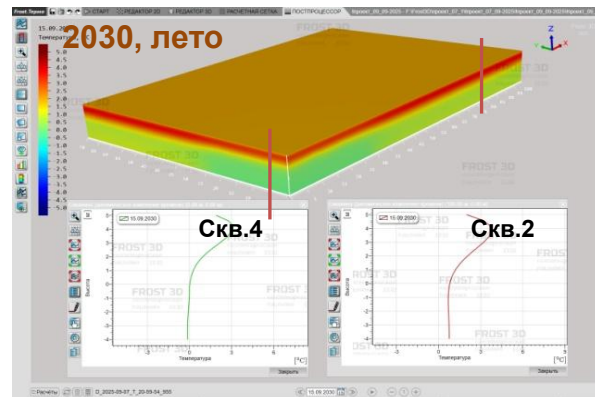
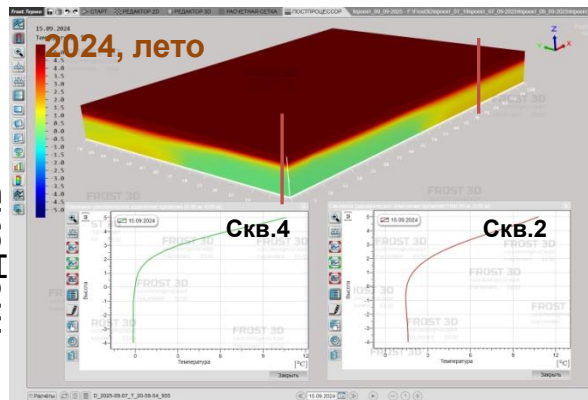
Летний период.

Хорошая сходимость результатов моделирования и непосредственных изменений.

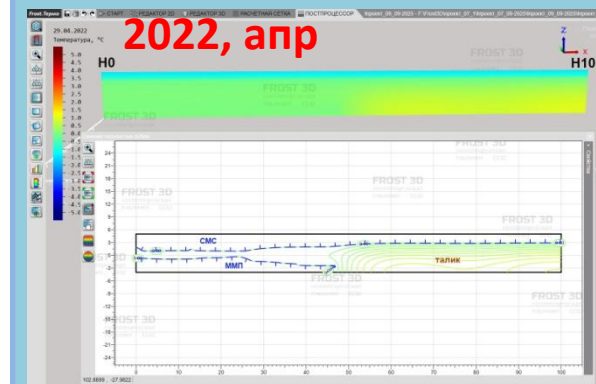
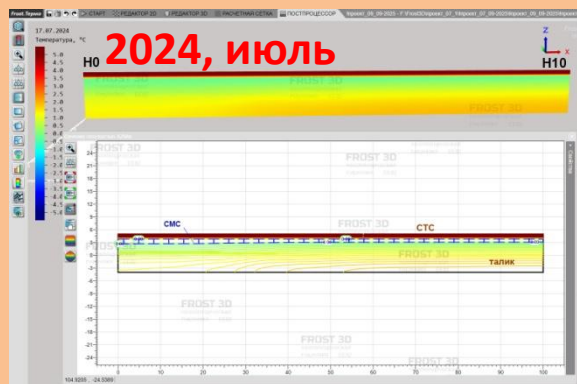
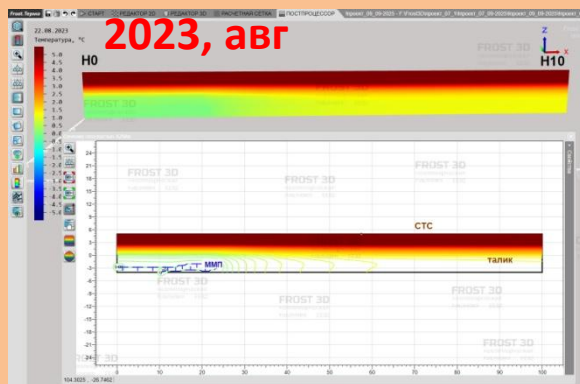
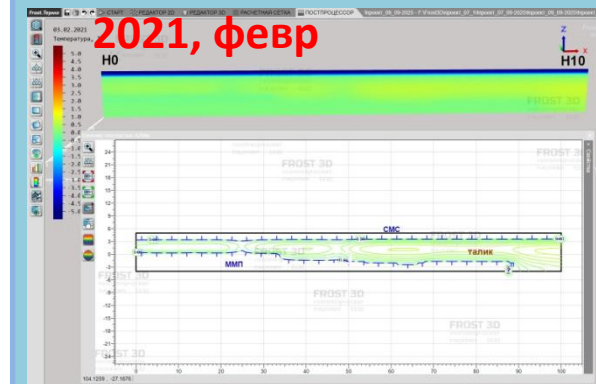
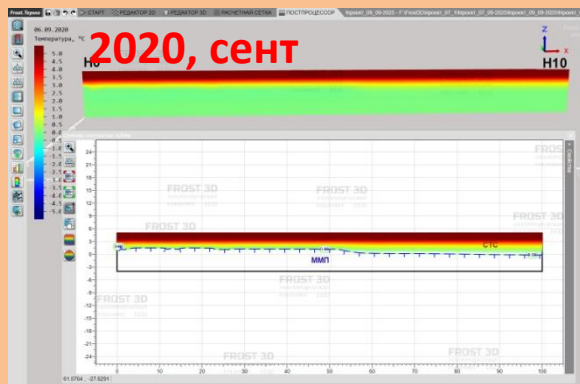
- С 2019 по 2024 г глубина протаивания по данным температурных замеров увеличилась в скв.4 с 2 до 3 м, а в скв. 2 – с 3 до 5 м. По модельным расчетам глубина протаивания в 2024 г больше на 0,5м только в скв. 4.
- К 2030 г по модельным расчетам в скв.4 сформируется несквозной талик в интервале глубин 3-7 м от поверхности, ниже сохраняться ММП с температурой 0...-0,1°C.
- К 2030 г по модельным расчетам в скв.2 в пределах изученного разреза мерзлота отсутствует, а температура пород положительная.



Модель

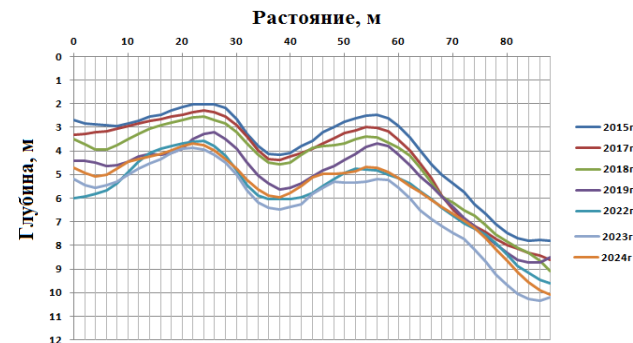
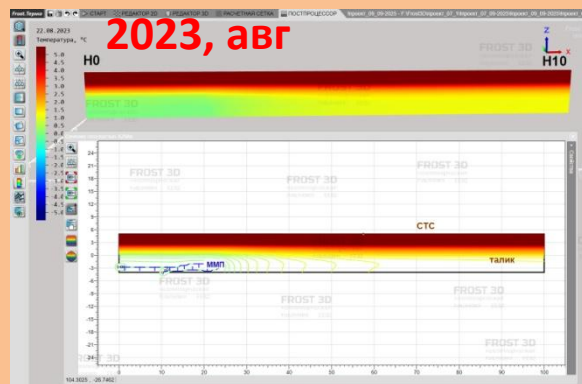
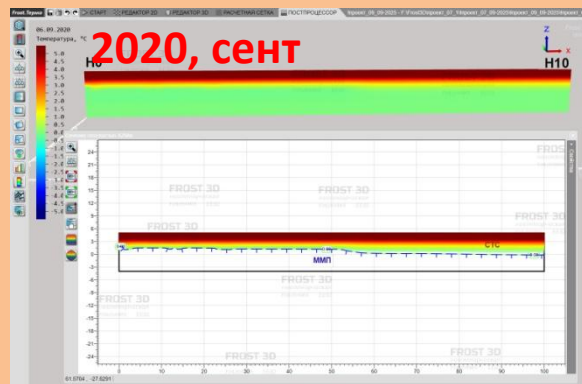


Площадка Кумжа, 2D-модель геокриологического разреза по профилю Н0...Н10



- пространственно-временное моделирование и визуализация процесса деградации мерзлоты по заданным сечениям
- пространственно-временное моделирование и визуализация сроков формирования CTC/CMC, перелетков и горизонтов несаливающейся мерзлоты

Верификация пространственно-временной модели по профилю Н0...Н10, Кумжа

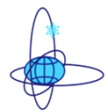


Летний период.

Удовлетворительная сходимость результатов моделирования и непосредственных наблюдений по профилю.

- По геофизическим данным с 2019 по 2024 г опускание кровли мерзлоты идет неравномерно, колеблется в интервале глубин от 3-4 м до 6-10 м. Но на протяжении всего профиля ММП еще сохраняются.

- По модельным расчетам уже к 2023 г ММП сохраняются фрагментарно на глубинах 7-9 м, а в 2024 г в пределах изученного 10-м разреза отсутствуют.



Заключение

Выполнен анализ результатов комплексного геокриологического и геофизического мониторинга на площадке Кумжа за период с 2014 по 2025 год.

Сформирована база данных о термическом состоянии грунтов и глубине залегания кровли мерзлоты в условиях современного потепления климата.

Наблюдается устойчивое повышение среднегодовой температуры грунтов на $0,1 \dots 0,2^{\circ}\text{C}$, изменение глубины сезонных колебаний и практически повсеместное опускание кровли мерзлоты.

С помощью георадиолокационной съемки и сейсмопрофилирования по постоянной сетке профилей установлено, что происходит неравномерное опускание кровли мерзлоты со средней скоростью $0,25$ м/год в зависимости от фациальных условий поверхности и влажности грунтов.

Цифровой геокриологический двойник, созданный в программе Frost 3D Термо, обеспечил быстрый и удобный доступ ко всей информации, автоматический анализ, численное моделирование и трехмерную визуализацию текущего и прогнозного термического состояния грунтов, в том числе проведены:

- моделирование и прогноз трехмерных полей пространственно-временного изменения температуры пород;
- моделирование и визуализация начала формирования несквозных таликов и скорости деградации мерзлоты;
- пространственно-временное моделирование и визуализация сроков формирования СТС/СМС, перелетков и горизонтов несливающейся мерзлоты

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Благодарю за внимание!



Frost.Термо поставляется в пакете программ Frost 3D вместе с [Frost.Осадки](#), [Frost.Свая](#) и [Frost.Климат](#). Существует несколько версий пакета, вы можете выбрать подходящую и осуществить подписку сроком от 3 до 24 месяцев с правом продления. Оптимальный выбор версии Frost 3D зависит от объема и сложности решаемых задач.

Минимальные системные требования

- **Операционная система:** Windows 10, 11; Linux с использованием Wine
- **Процессор:** Intel, AMD
- **Оперативная память:** от 2 Гб
- **Видеокарта:** NVIDIA, AMD, Intel – с поддержкой OpenGL 4.0
- **Свободное место на диске** (для установки программы): 5 Гб