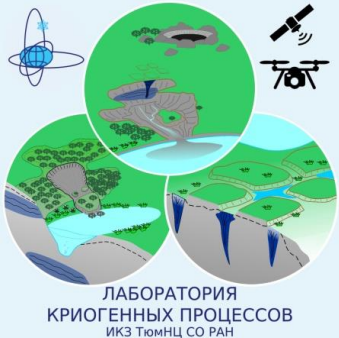
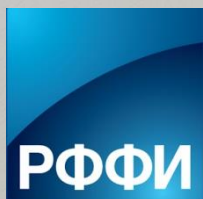




Термоцирки Карского региона: полевые и дистанционные методы исследований

**А.В. Хомутов, М.О. Лейбман, Ю.А. Дворников, Е.А. Бабкина, Н.Г. Белова,
А.И. Кизяков, Р.Р. Хайруллин, Н.Б. Нестерова, Я.В. Тихонравова**
*Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН
Тюменский государственный университет
Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова
Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН*



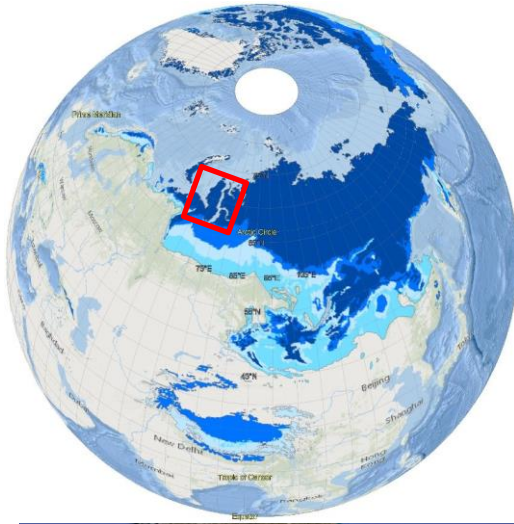
При поддержке гранта РФФИ 18-05-60222
«Криогенные рельефообразующие процессы
Арктических равнин с подземными льдами в
условиях современных климатических колебаний
вдоль Карской субширотной трансекты»

*Фотографии из архивов авторов



Термоденудация – деструктивный рельефообразующий криогенный процесс, необходимым условием которого является наличие в разрезе подземных льдов и сильнольдистых мерзлых пород (Кизяков, Лейбман 2016). Активизация этого процесса вызывается, как правило, увеличением глубины сезонного протаивания на участках близкого к поверхности залегания подземных льдов. В зависимости от сочетания криолитологических, геоморфологических и климатических условий на разных участках и в разные промежутки времени происходит вскрытие пластовых льдов и формирование специфических форм рельефа – термоцирков и термотеррас (Лейбман, Кизяков 2007)

Район исследований



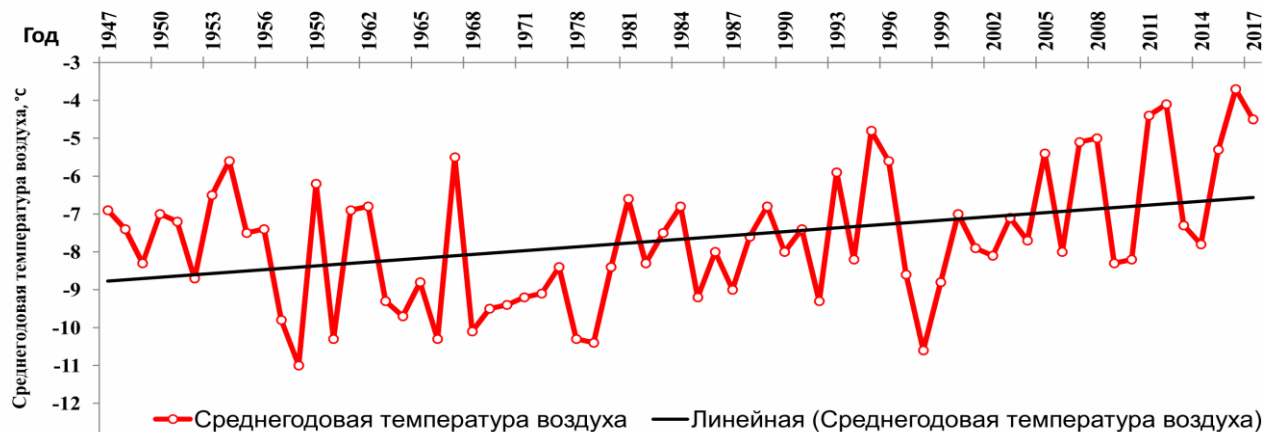
Направления исследований

- 1. Анализ климатических факторов развития термоцирков**
- 2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках**
- 3. Полевой мониторинг развития термоцирков на отдельных ключевых участках**
- 4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона**

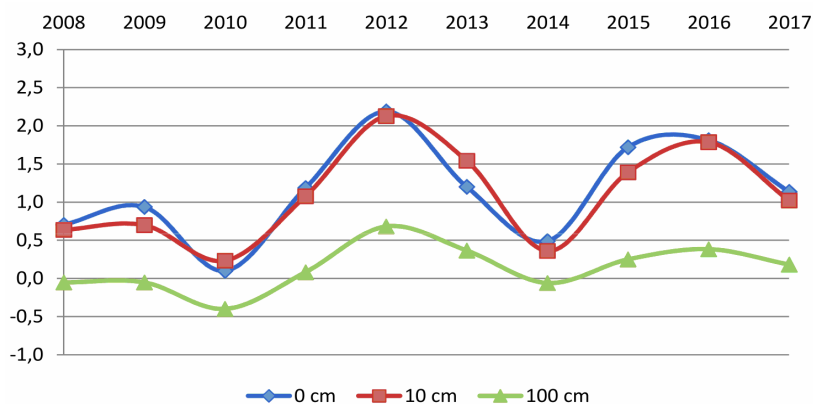
1. Анализ климатических факторов

Колебания климата как причины активизации деструктивных криогенных процессов

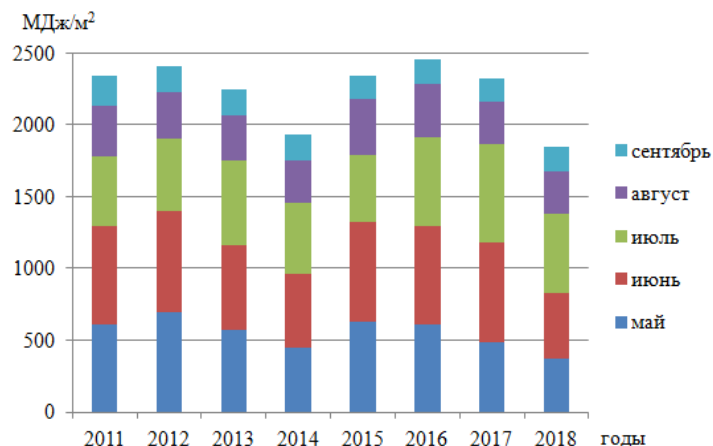
Динамика колебаний и тренд повышения температуры воздуха по метеостанции Марре-Сале



Повышение средней годовой температуры пород, положительные экстремумы в 2012 и 2016 гг



Суммарная солнечная радиация для теплого периода с мая по сентябрь 2011-2018 гг. (м/с Марресале, пересчитано по данным <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)



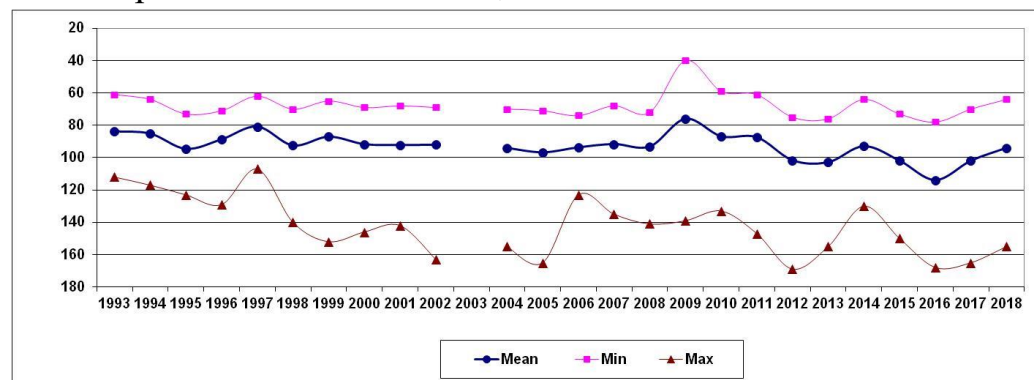
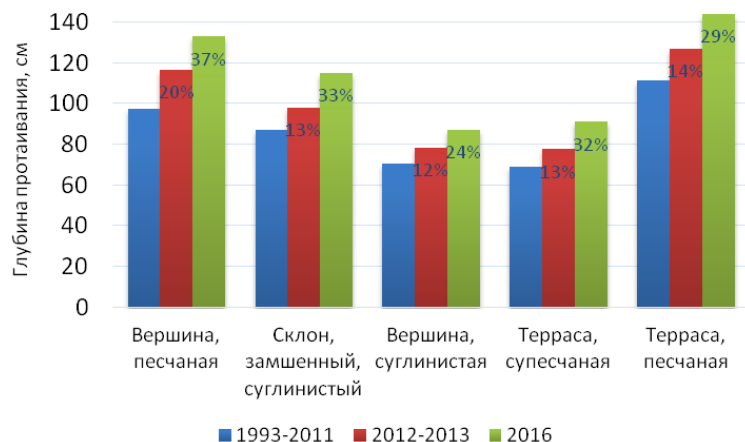
Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факашук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019, №4, С. 99–109.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Иванова А.А. Термоцирки Карского региона: новый этап развития термоденудационных процессов на центральном Ямале (на подготовку к печати в редакцию)

1. Анализ климатических факторов

Колебания климата как причины активизации деструктивных криогенных процессов

Увеличение глубины сезонного протаивания: CALM R5, R5abcd



Новые оползни по зарастающим термоциркам

Начало активности термоцирков



Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факашук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019, №4, С. 99–109.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Иванова А.А. Термоцирки Карского региона: новый этап развития термоденудационных процессов на центральном Ямале (на подготовку к сдаче в редакцию)

1. Анализ климатических факторов

Климатические факторы развития термоцирков в Карском регионе (<http://rp5.ru/>, <http://aisori-m.meteo.ru>)

Амдерма

Год/теплый период	T _{год/год} °C	Индекс оттаивания, градусодни	Продолжительность теплого периода, дни	Сумма летних осадков, мм	Холодный период	Индекс промерзания, градусодни	Сумма зимних осадков, мм
ср. 1993-2011	-5,8	690	127	197	ср. (1993-94)-(2010-2011)	-2843	225
2012	-3,0	1051	150	295	2011-12	-1944	134
2013	-5,3	901	122	149	2012-13	-2662	160
2014	-6,0	530	116	170	2013-14	-2797	212
2015	-4,0	825	141	282	2014-15	-2409	261
2016	-2,1	1364	163	166	2015-16	-1955	159
2017	-3,2	844	131	72	2016-17	-2396	236
2018	-4,3	823	133	185	2017-18	-2300	242
2019	-4,2	719	136	243	2018-19	-2089	189
2020		34 (май)	20 (май)	33 (май)	2019-20	-1875	184

Марресале

Год/теплый период	T _{год/год} °C	Индекс оттаивания, градусодни	Продолжительность теплого периода, дни	Сумма летних осадков, мм	Холодный период	Индекс промерзания, градусодни	Сумма зимних осадков
ср. 1993-2011	-7,0	719	131	152	ср. (1993-94)-(2010-2011)	-3320	152
2012	-4,1	1054	147	233	2011-12	-2333	135
2013	-7,3	748	110	150	2012-13	-3110	145
2014	-7,7	492	117	151	2013-14	-3292	203
2015	-5,2	913	141	179	2014-15	-3027	196
2016	-3,7	1427	163	196	2015-16	-2437	127
2017	-4,6	817	132	77	2016-17	-3121	151
2018	-6,1	720	133	194	2017-18	-2778	232
2019	-5,3	823	122	150	2018-19	-2610	185
2020		42 (май)	19 (май)	19 (май)	2019-20	-2205	246

Антипаюта

Год/теплый период	T _{год/год} °C	Индекс оттаивания, градусодни	Продолжительность теплого периода, дни	Сумма летних осадков, мм	Холодный период	Индекс промерзания, градусодни	Сумма зимних осадков, мм
ср. 2003-2011	-8,2	1059	128	142	ср. (2003-2004)-(2010-2011)	-4086	133
2012	-6,4	1228	129	336	2011-12	-3172	178
2013	-8,9	1107	119	99	2012-13	-4258	124
2014	-9,4	813	117	60	2013-14	-4177	181
2015	-7,0	1212	128	40	2014-15	-3949	108
2016	-5,8	1504	146	113	2015-16	-3250	109
2017	-6,6	1004	123	154	2016-17	-4094	121
2018	-7,9	1146	133	128	2017-18	-3813	148
2019	-6,5	1251	140	269	2018-19	-3627	161
2020		78 (май)	25 (май)	5 (май)	2019-20	-2958	224

2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках

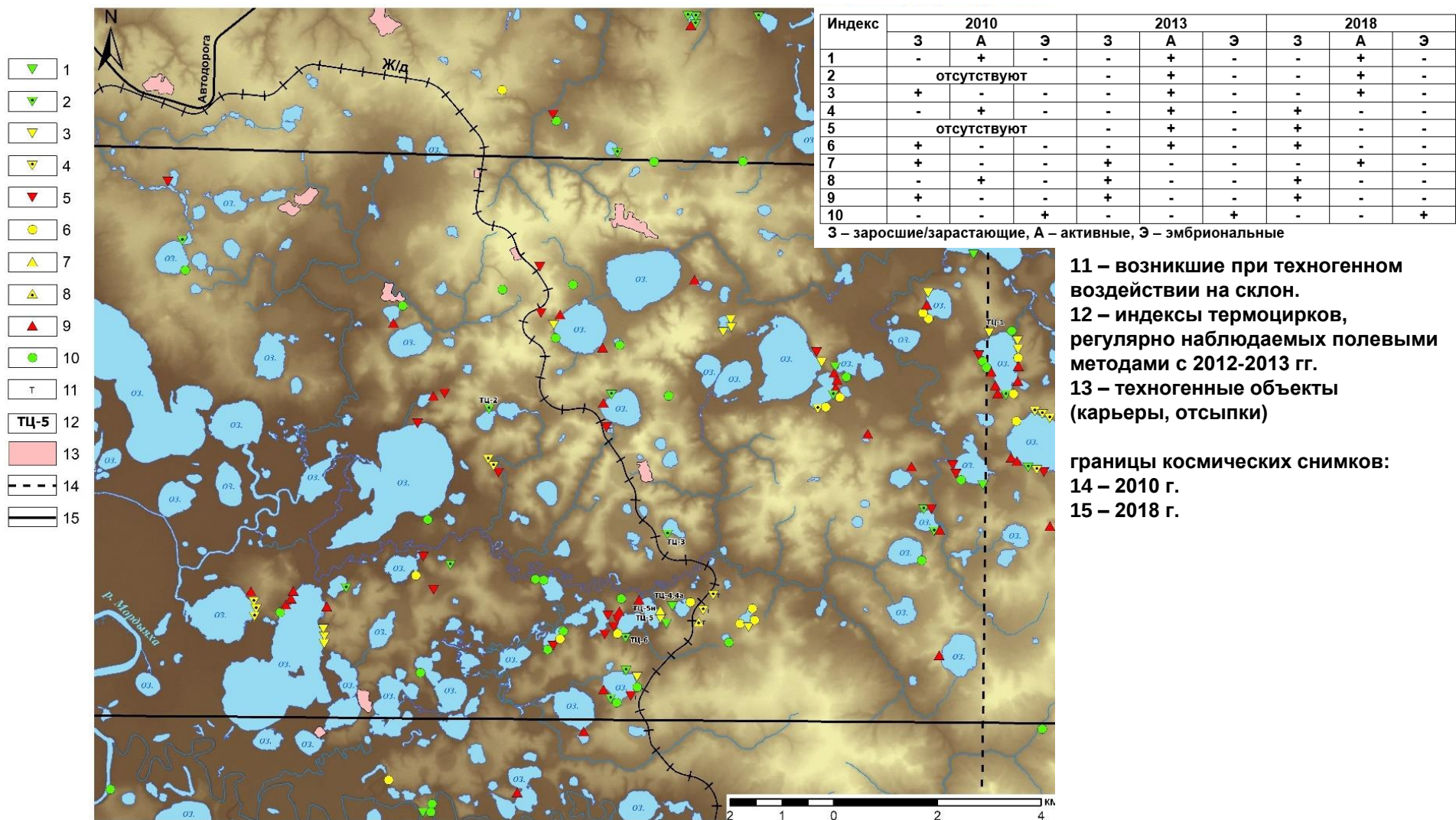
Метаданные используемых космических снимков сверхвысокого разрешения

Район, участок (координаты)	Съемочная система	Дата съемки	Азимут сканирования, град	Угол возвышения, град	Высота съемки, км	Пространственное разрешение, м	Площадь покрытия территории исследования, кв. км	
Центральный Ямал, НИС «Васькины Дачи» (68°57'52,1"В 70°16'23,6"С)	QuickBird-2	30.07.2010	228,3	19,1	482	0,61	314,2	314,2
	GeoEye-1	05.07.2013	50,8	25,2	681	0,41	238,4	346,6
	WorldView-2	21.07.2013	47,0	24,8	700	0,56	108,2	
	WorldView-2	10.07.2018	64,8	19,9	700	0,41	149,3	203,1
	WorldView-3	10.07.2018	272,0	24,7	620	0,41	101,7	
Гыданский полуостров, ключевой участок Центрально- Гыданский (77°50'47,6"В 70°9'48,7"С)	QuickBird-2	10.07.2009	251,0	19,0	482	0,50	77,7	
	GeoEye-1	01.07.2013	230,3	26,3	681	0,40	77,7	
	WorldView-2	17.07.2019	264,9	20,5	700	0,40	63,5	



2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках

Карта распространения термоцирков, характеризующихся разной активностью в 2010, 2013 и 2018 гг.



2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках

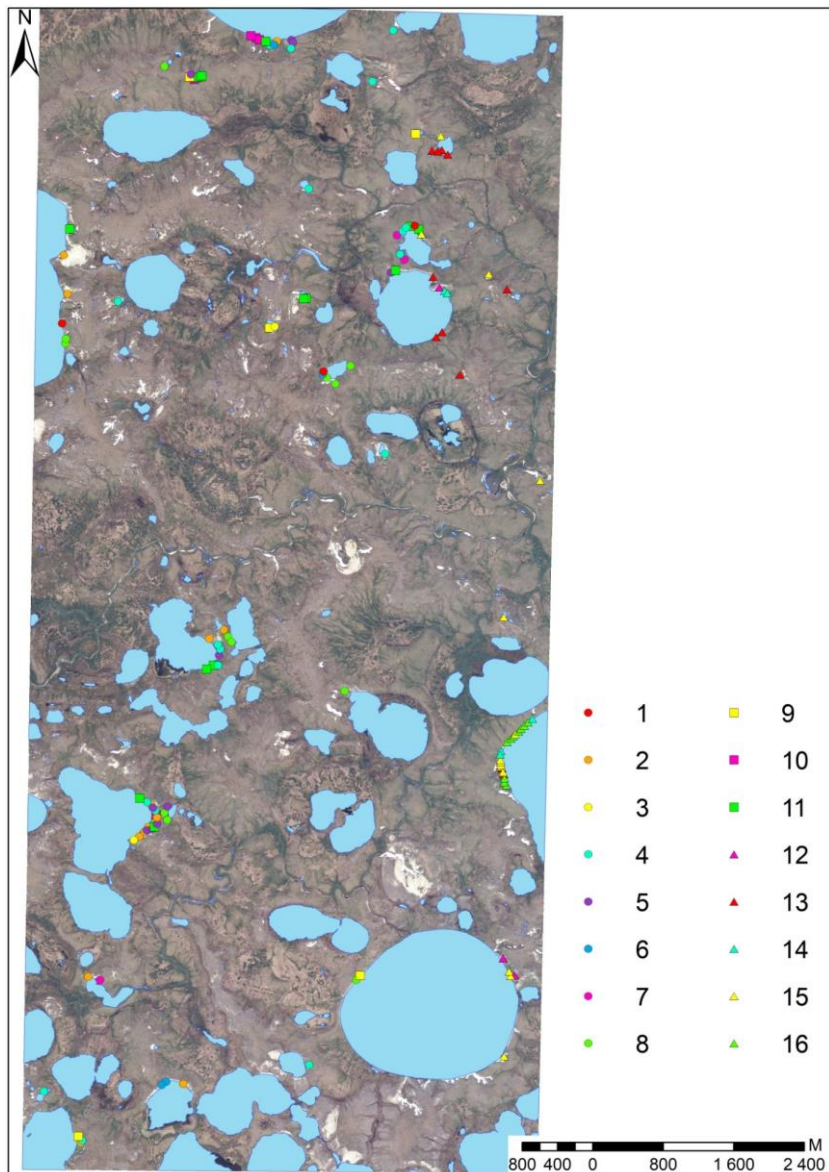
Метаданные используемых космических снимков сверхвысокого разрешения

Район, участок (координаты)	Съемочная система	Дата съемки	Азимут сканирования, град	Угол возвышения, град	Высота съемки, км	Пространственное разрешение, м	Площадь покрытия территории исследования, кв. км	
Центральный Ямал, НИС «Васькины Дачи» (68°57'52,1"В 70°16'23,6"С)	QuickBird-2	30.07.2010	228,3	19,1	482	0,61	314,2	314,2
	GeoEye-1	05.07.2013	50,8	25,2	681	0,41	238,4	346,6
	WorldView-2	21.07.2013	47,0	24,8	700	0,56	108,2	
	WorldView-2	10.07.2018	64,8	19,9	700	0,41	149,3	203,1
	WorldView-3	10.07.2018	272,0	24,7	620	0,41	101,7	
Гыданский полуостров, ключевой участок Центрально- Гыданский (77°50'47,6"В 70°9'48,7"С)	QuickBird-2	10.07.2009	251,0	19,0	482	0,50	77,7	
	GeoEye-1	01.07.2013	230,3	26,3	681	0,40	77,7	
	WorldView-2	17.07.2019	264,9	20,5	700	0,40	63,5	



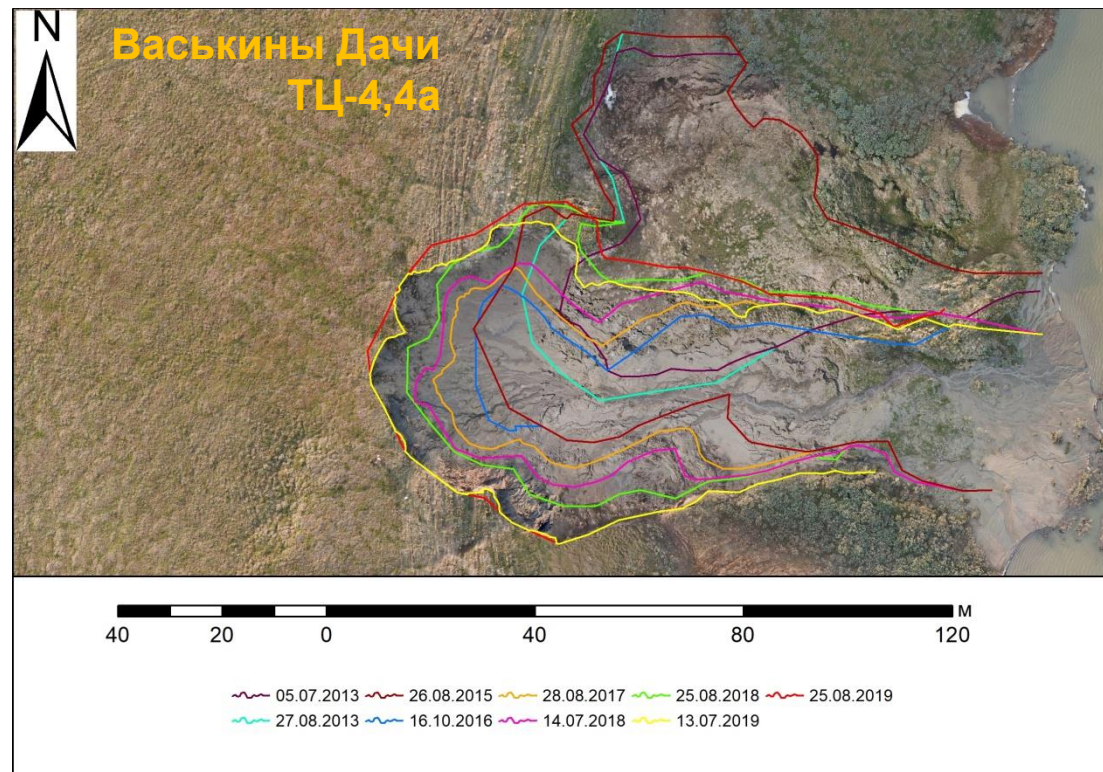
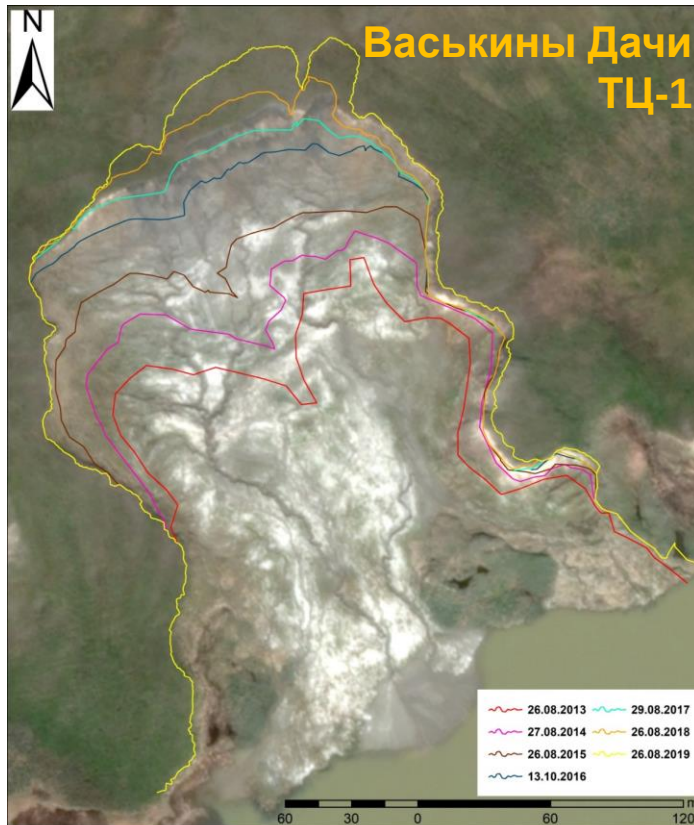
2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках

Предварительная классификация активности выделенных по космоснимкам 2009, 2013 и 2019 гг. термоденудационных форм рельефа на ключевом участке Центрально-Гыданский.



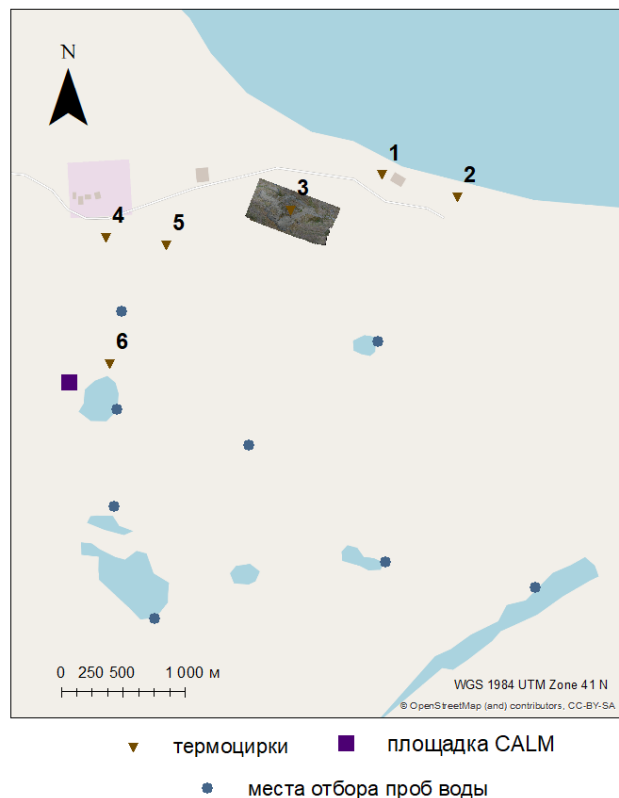
ID	Состояние термоденудационной формы рельефа
1	Неактивна в 2009, 2013 и 2019
2	Неактивна в 2009 и 2013, активна в 2019
3	Неактивна в 2009, активный в 2013, неактивна в 2019
4	Активна в 2009, неактивна в 2013 и 2019
5	Активный в 2009 и 2013, неактивна в 2019
6	Активна в 2009, неактивна в 2013, активна в 2019
7	Неактивна в 2009, активна в 2013 и 2019
8	Активный в 2009, 2013 и 2019
9	Возникла в 2009 - 2013, неактивна в 2019
10	Возникла в 2009 - 2013, активна в 2019
11	Возникла в 2009 - 2019
12	Неактивна в 2009 и 2013, без данных на 2019
13	Активна в 2009, неактивна в 2013, без данных на 2019
14	Неактивна в 2009, активна в 2013, без данных на 2019
15	Активна в 2009 и 2013, без данных на 2019
16	Возникла в 2009 - 2013, без данных на 2019

3. Полевой мониторинг развития термоцирков на ключевых участках

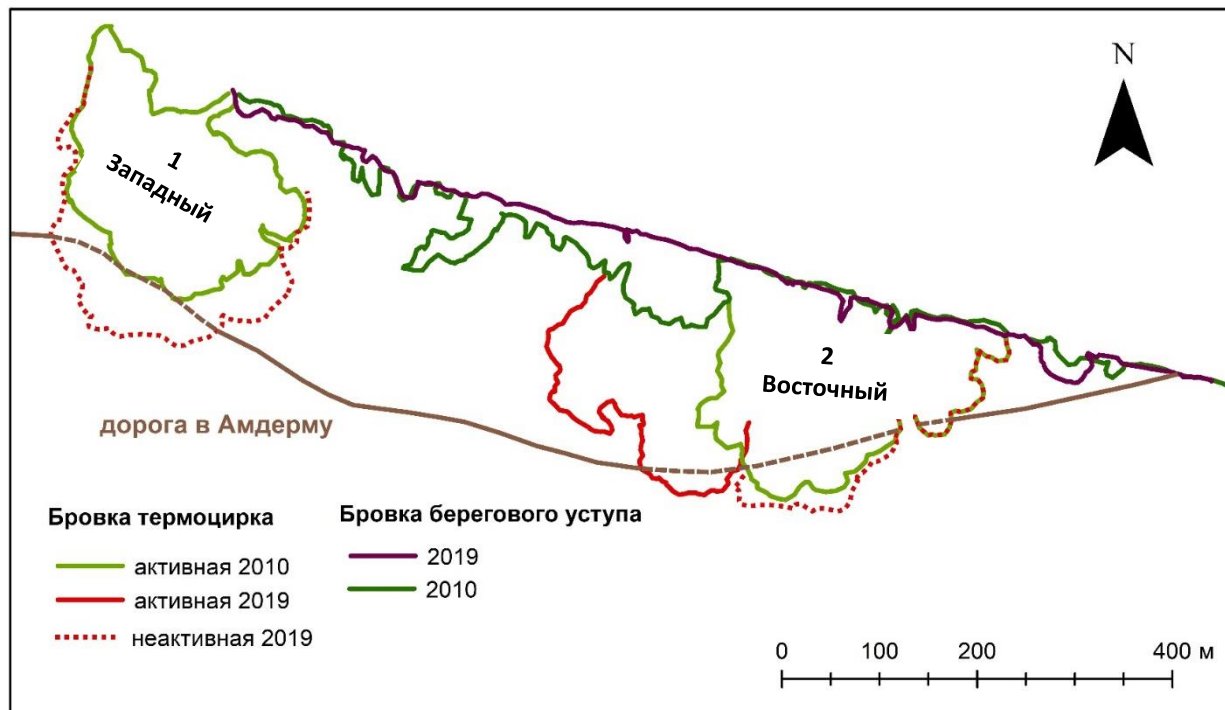


3. Полевой мониторинг развития термоцирков на ключевых участках

Карта фактического материала работ на
ключевом участке Первая Песчаная
Югорский в сентябре 2019 г.



Динамика береговых термоцирков



Термоцирки:

- 1 – Западный
- 2 – Восточный
- 3 – Внутренний
- 4 – Эмбриональный 1
- 5 – Эмбриональный 2
- 6 – Дальний

		Среднее линейное отступление бровки: весь период / в среднем за год, м	
		2001-2010	2010-2019
Западный ТЦ		65,8/7,3	42,0/4,7
Восточный ТЦ	Вост.ТЦ (стаб.)	39,4/4,4	6,8/0,7
	Центр.ТЦ		78/8,6

Общая потеря
площади за счет
отступления
берегового уступа
≈3500 м²

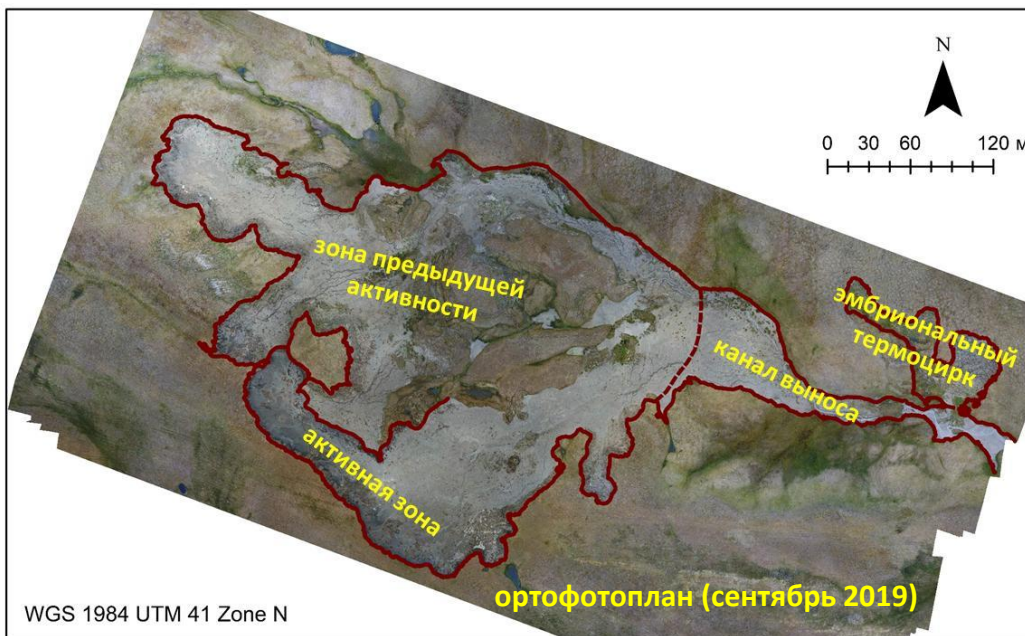
3. Полевой мониторинг развития термоцирков на ключевых участках

Карта фактического материала работ на
ключевом участке Первая Песчаная
Югорский в сентябре 2019 г.



Термоцирки:

- 1 – Западный
- 2 – Восточный
- 3 – Внутренний
- 4 – Эмбриональный 1
- 5 – Эмбриональный 2
- 6 – Дальний



3. Полевой мониторинг развития термоцирков на ключевых участках

1 - Западный



2 - Восточный



3 - Внутренний



4 - Дальний



3. Полевой мониторинг развития термоцирков на ключевых участках Эмбриональные термоцирки (Югорский)



4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Распространение идентифицированных термоцирков на полуостровах Ямал и Гыдан

Активные термоцирки



WorldView-2, 0.4 m

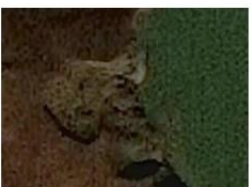


Yandex.maps, 2018,
<https://maps.yandex.ru/>

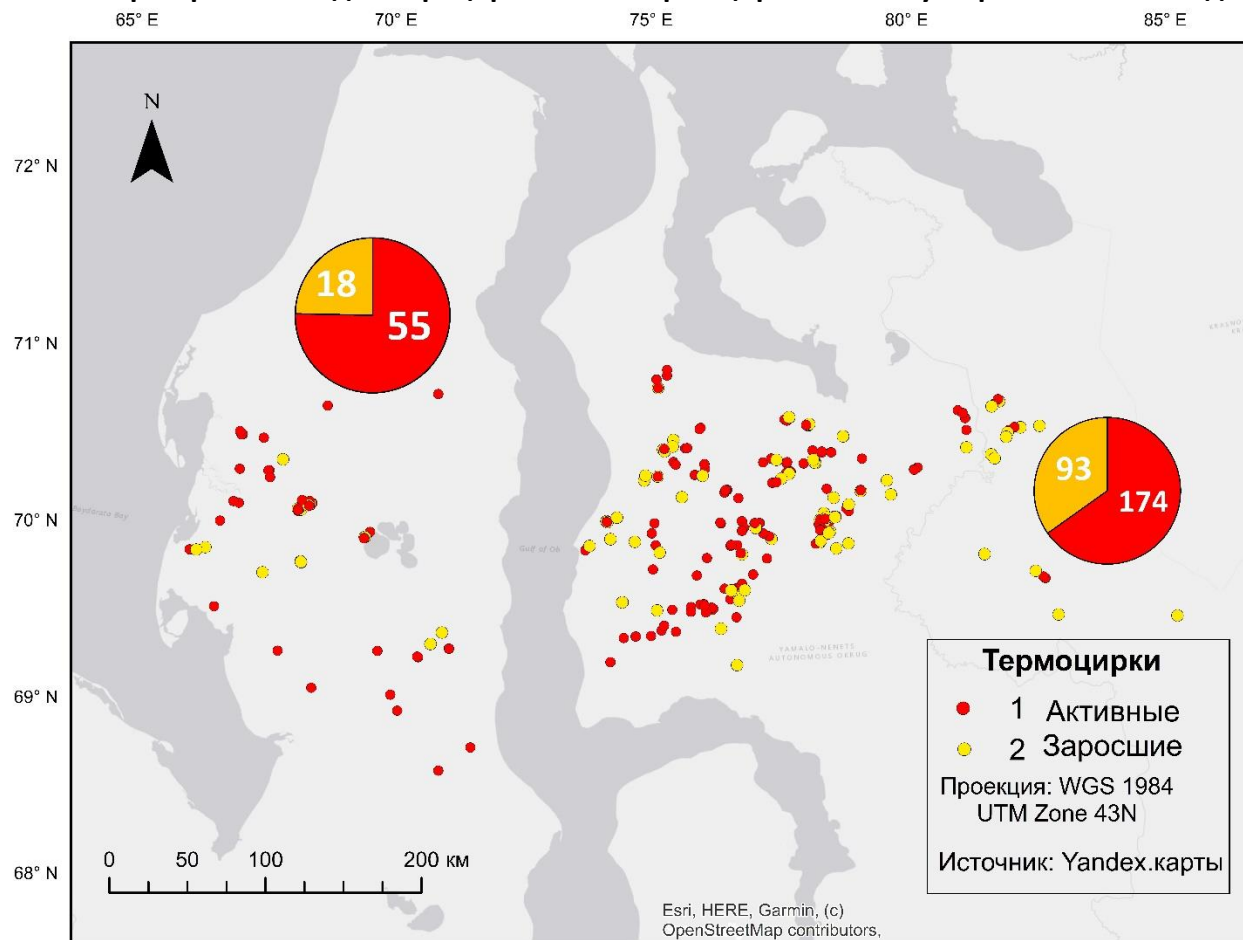
Заросшие/зарастающие термоцирки



WorldView-2, 0.4 m



Yandex.maps, 2018,
<https://maps.yandex.ru/>



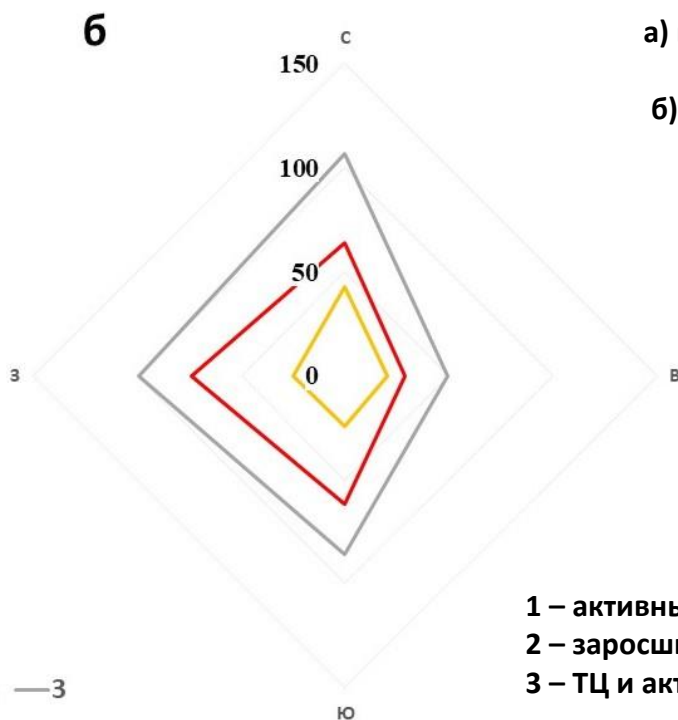
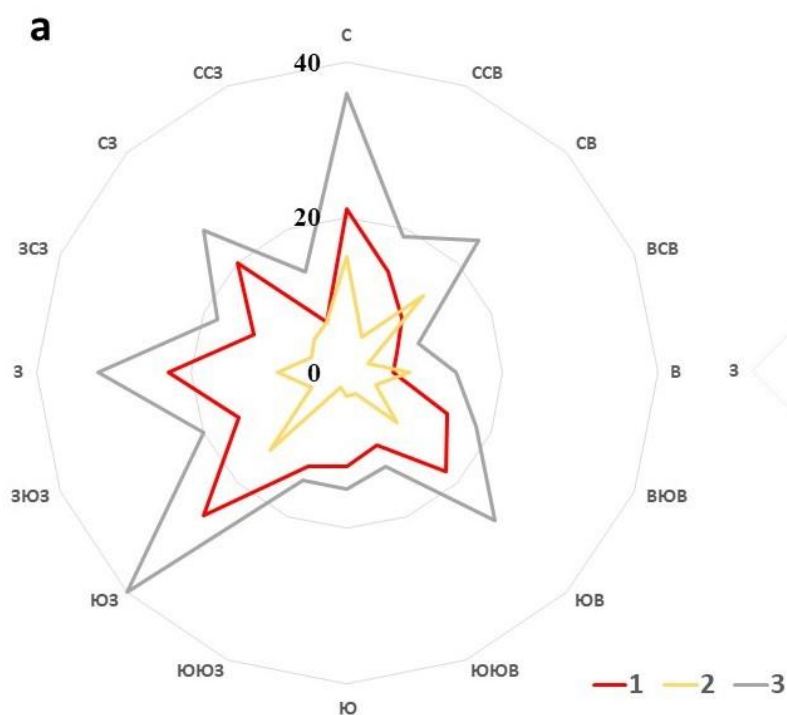
-отмечено более 400 объектов

- достоверно идентифицирован 341 термоцирк

-расположены между 71°с.ш. и 69° с.ш.

4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Распределение экспозиций склонов ТЦ на Ямале и Гыдане



а) по 16 румбам

б) по 4 румбам

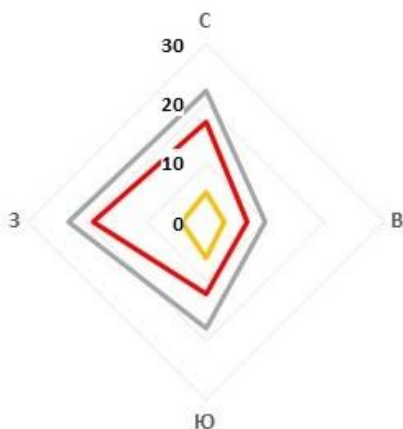
1 – активные ТЦ
2 – заросшие ТЦ
3 – ТЦ и активные, и заросшие.

4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Распределение экспозиций склонов ТЦ по 4 румбам

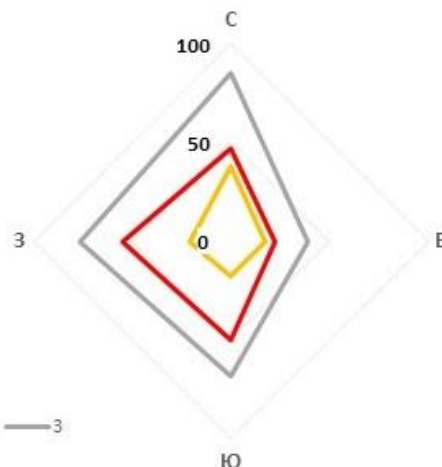
Ямал

	1	2	3
С	17	5	22
В	7	3	10
Ю	12	6	18
З	19	4	23



Гыдан

	1	2	3
С	47	38	85
В	22	17	39
Ю	50	18	68
З	55	21	76



— 1 — 2 — 3

- 1 – активные ТЦ
- 2 – заросшие ТЦ
- 3 – ТЦ и активные, и заросшие.

4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Примеры активных термоденудационных форм (сезон 2020)

Ямал - - **Васькины Дачи** и южнее



4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Примеры активных термоденудационных форм (сезон 2020)

Центральная часть полуострова Гыдан



Выводы

1. Анализ климатических факторов развития термоцирков

Вероятно усиление активности термоденудационных процессов как минимум для ранее вскрывшихся термоцирков, возможная ре-активизация зарастающих термоцирков, а к концу теплого периода 2020 г. вскрытие пластовых залежей на стабильных склонах, где глубина кровли льда превышает значения, достигнутые в 2012 г. сезонным протаиванием. Также наиболее вероятно, что возрастет доля эмбриональных термоцирков, наблюдаемых в последние годы как на Центральном Ямале, так и на побережье Югорского полуострова, а значительная часть существующих эмбриональных термоцирков превратится в крупные.

2. Анализ распространения и активности термоденудационных процессов на ключевых участках

Проведенная для территории ключевого участка «Васькины Дачи» подробная классификация характера развития термоцирков по имеющимся ДЗЗ показала, что помимо крупных термоцирков, находящихся в эти три временных срезах (2010, 2013, 2018) на разных стадиях активности, выделено существенное количество эмбриональных термоцирков. За период с 2010 по 2018 гг. активность термоденудации повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона 2012 г., а затем постепенно пошла на спад. При этом, условия аномально жаркого лета 2016 г. не внесли существенного вклада в активность термоденудационных процессов. Наблюдающиеся наиболее аномальные на современном этапе условия холодного сезона (теплая зима 2019-2020) и рано начавшегося теплого сезона (раннее лето 2020) могут привести к новому усилению термоденудации вдоль всей Карской субширотной трансекты.

Выводы

3. Полевой мониторинг развития термоцирков на отдельных ключевых участках

По результатам экспедиции на побережье Югорского полуострова на территории Ненецкого автономного округа в сентябре 2019 г. выявлено, что активизация термоденудационных процессов, не связанных с волновой деятельностью моря, произошла не только на полуостровах Ямал и Гыдан, но и вблизи побережья на существенном удалении от морского берега.

4. Инвентаризация термоцирков по дистанционным данным и статистический анализ их характеристик, а также условий формирования на территории Карского региона

Изучение распределения экспозиций склонов в полученной выборке найденных термоцирков показало статистически значимое неравномерное распределение направлений склонов, на которых развиваются термоцирки. При этом ни одно направление не было отмечено преобладающим со статистической значимостью, в то время как восточные экспозиции были найдены статистически малозначимыми по сравнению со всеми остальными. Результаты этого анализа частично согласуются с подобными исследованиями на севере Канады, а различия, вероятно, объясняются отличиями региональных особенностей.

**Спасибо
за внимание!**