



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

Кафедра криолитологии и гляциологии

Анализ воздействия опасных криогенных и гляциальных процессов на инфраструктуру Арктики

Турчанинова А.С., Гребенец В.И., Кизяков А.И., Сократов С.А.,
Стрелецкая И.Д., Толманов В.А

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 18-05-60080 «Опасные нивально-гляциальные и криогенные процессы и их влияние на инфраструктуру в Арктике»

Москва – 2020

Изменение геокриологических условий

Движение техногенных каменных глетчеров



криолитогенез,
распространение и
строение вечной
мерзлоты,

температура,

криогенные процессы,
тренды климатических
изменений,

техногенез

Пучение



Термокарст

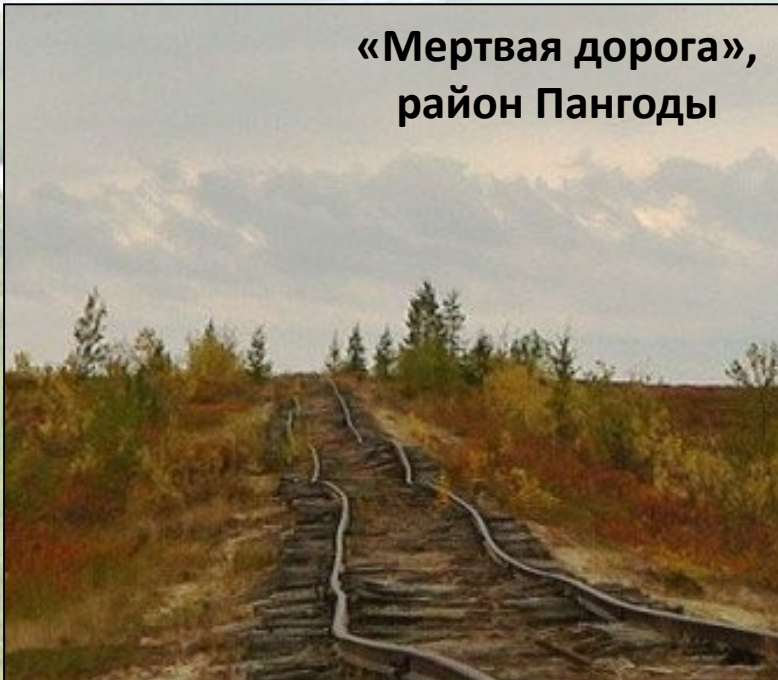


Термоэрозия



Деформации инфраструктуры в Арктике

«Мертвая дорога»,
район Пангоды



Норильск



Оганер



Игарка



Певек



Деформации на урбанизированных территориях криолитозоны



Деформации зданий



*Деформации
при
развитии
морозного
пучения*



*Снесенный
аварийный
жилой дом*



Деформации объектов линейной инфраструктуры



ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТОВ. Более 75% всех зданий и сооружений в криолитозоне построено и эксплуатируется по принципу 1 СП 25.13.330 2012 (с сохранением мерзлоты), т.е. при деградации происходит снижение несущей способности замороженных фундаментов

К началу XXI века около 250 крупных сооружений в городах Норильского промрайона имели существенные деформации, связанные с ухудшением мерзлотных условий; около 100 объектов находились в аварийном состоянии, 35 девяти- и пятиэтажных дома, возведенных в 60-80-е годы, были снесены или подлежали сносу.



Оценка уровня деформированности зданий и сооружений в криолитозоне России

Деформировано (оценка на начало XX века)

Якутск – 48% (без учёта «старых деревяшек»)

Вилуйск – около 70%

Тикси – 22 %

Воркута – 80 %

Чита – 60 %

Небольшие города Бурятии – 50 -70 % (без учёта «старых деревяшек»)

Дудинка – 35 % (без учёта «старых деревяшек»)

Норильск – около 25 %

Игарка – около 60 % (при почти 100-% деформированности старого деревянного фонда)

Амдерма – 50 %

Диксон – 35 % (без учёта «старых деревяшек»)

Певек - 50 %

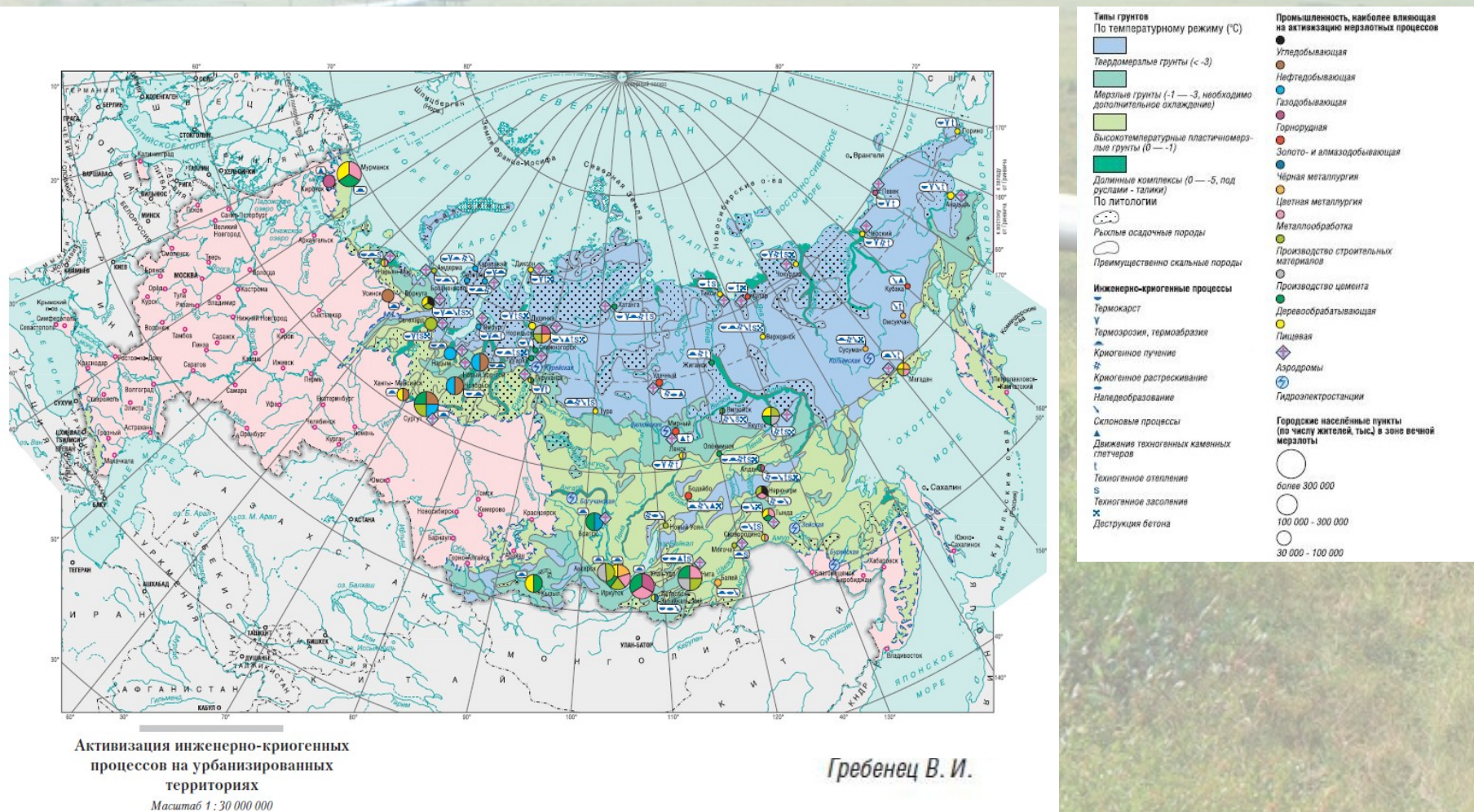
Городские поселения Магаданской области – 40 - 55 %

Национальные пос. Крайнего Севера – почти 100%

Малые грунтовые плотины с мерзлыми противифльтрационными ядрами – практически 100%

(По данным Я.Кроника (2001, 2006, 2011), В. Церна (2006), Л. Хрусталева (2000, 2006, 2011), В. Гребенца (2000, 2009), В. Гурьянова (2007), Д. Шестернёва (2007), Н.Кутвицкой (2000, 2006))

Карта активизации инженерно-криогенных процессов на урбанизированных территориях



Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Сезонное пучение

I принцип: $Fr = u \sum R_{af, i} h_i$
II принцип: $Fr = u \sum f_i h_i$

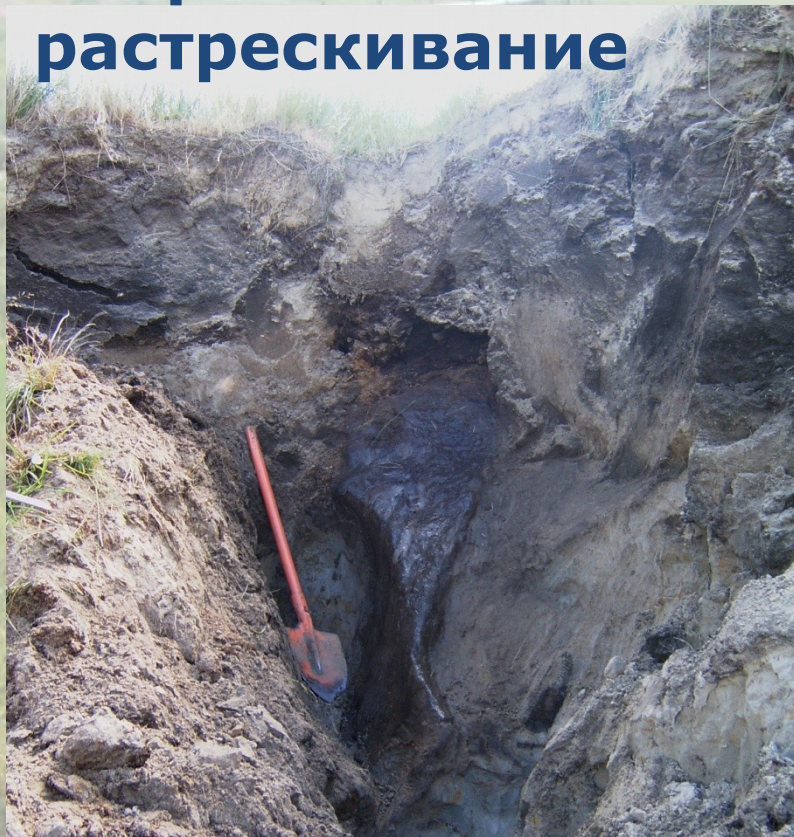
Перераспределение снега, увеличение глубины СТС

Трещины в фундаментах, деформации элементов сооружений, разрушение покрытий, нарушение противофильтрационной устойчивости, вертикальные перемещения

Теплоизолирующие материалы, отвод вод, замена грунтов, прогрев, засоление, применение антифрикционных покрытий

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Морозобойное растрескивание



Для конструкций, в т.ч.
фундаментов:

$N = \frac{\text{проектная прочность}}{\text{фактическая прочность}}$



Разрушение конструкций, разрыв подземных коммуникаций, нарушение стыков элементов конструкций



Замена грунтов, тепло- и гидроизоляция поверхности, насыпные грунты, мерзлотные пояса с СОУ, усиление стыков

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Наледеобразование

Деформации мостовых опор, пролетных строений, дорожного полотна; накопление льда на дорожном полотне, деформации зданий при образовании наледных бугров, затопление помещений

$V=F$ (гидродинамический напор, свойства грунта, интенсивность тепловыделения от объектов)

Уборка снега, пересечение линейными сооружениями поверхностных и подземных вод

Морозные пояса с СОУ, изменение русел, водопропускные устройства, понижение уровня подземных вод,

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Солифлюкция



Нарушение растительного покрова на склонах, переувлажнение пород СТС

Оползание откосов; разрушение отдельных сооружений, повышение оползневого давления на фундаменты, разрушение дорог и коммуникаций



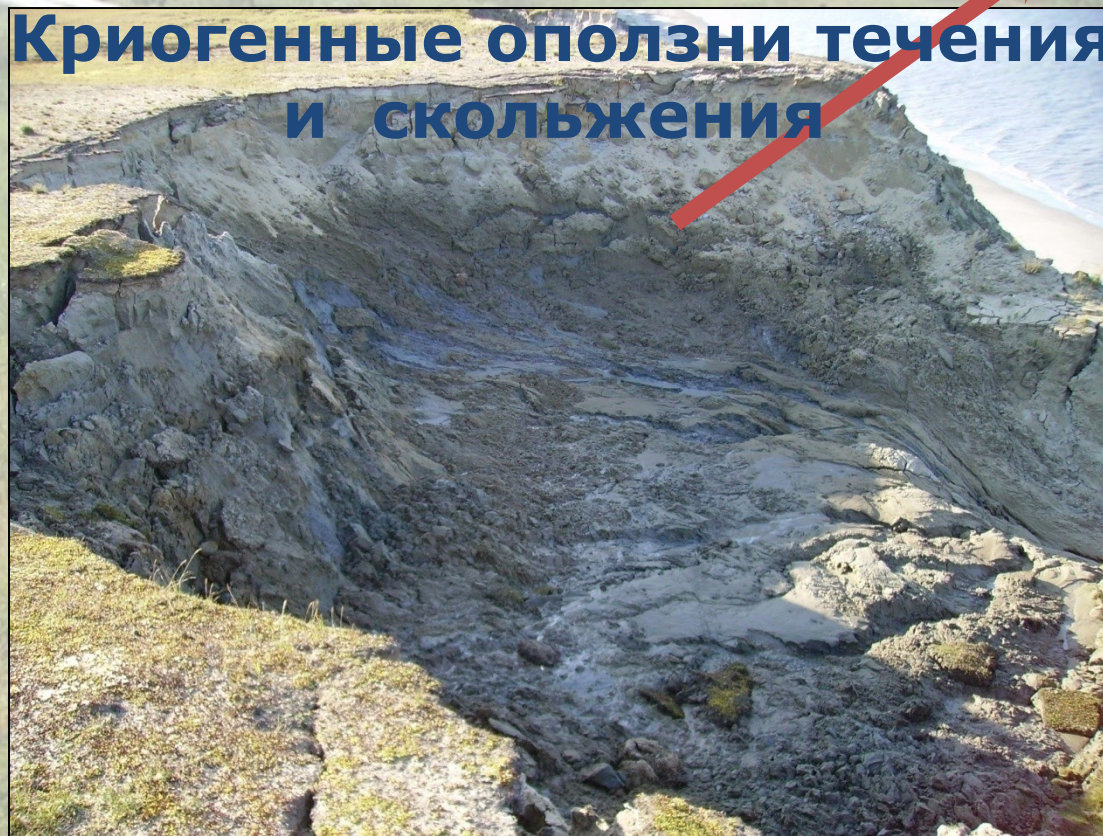
Исключение переувлажнения сезонно-талого слоя; устройство мерзлотных поясов с применением СОУ

$T=F$ (скорость солифлюкции, несущая способность фундамента, жесткость здания)

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Непрогнозируемые перемещения склонов, откосов техногенных отвалов и насыпей

Криогенные оползни течения и скольжения



Нарушение растительного покрова на склонах, переувлажнение пород СТС, протаивание переходного сильнольдистого горизонта

Вывод сооружений из опасной зоны

Нудерж. > Нсдвиг.

$N = F$ (свойства грунтов и покровов, глубина оттаивания, льдистость переходного горизонта, климатические характеристики, интенсивность техногенного подтопления и отопления)

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Движение каменных глетчеров, курумов

$V=F$ (крутизна, объем отложений, физико-механические свойства грунтов, характер подстилающей поверхности)

Круглогодичное складирование отвалов на склонах (особенно на сильнольдистых грунтах)

Разрушение сооружений, попадающих в зону схода отвала или его части

Вывод сооружений из опасной зоны

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

**«Морозная деструкция»
(криоген.выветрив.-морозное
разрушение материала и
диспергирование грунтов)**

Деструкция железобетона
подземных конструкций, в т.ч.
фундаментов, повышение
просадочности и
пучинистости грунтов

$N = \frac{\text{проектная прочность}}{\text{фактическая прочность}}$

Уменьшение
обводненности СТС,
применение
эффективных способов
гидроизоляции
конструкций,
противопучинная
обработка грунтов и
конструкций

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Термокарст

Факторы, способствующие
возникновению и развитию



Уничтожение
растительного
покрова,
отепляющее
влияние зданий
и сооружений



Трещины в
конструкциях;
возможное
обрушение
сооружений или их
частей



Теплоизолирующие
подсыпки, замена грунтов
оснований,
проветриваемые
подполья, охлаждающие
каналы,
сезонноохлаждающие
устройства (СОУ),
холодильные машины,
применение жидкого
азота и углекислоты

$$F_f < F_{fd} / \gamma_{cyn}$$

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Термоэрозия

Разрушение дорог, сооружений, коммуникаций, оврагообразование

Отвод ливневых и паводковых вод с урбанизированных территорий, применение СОУ для создания противифльтрационных “порогов”, укрепление склонов и откосов

Развивается в сильнольдистых, легкоразмываемых многолетнемерзлых дисперсных породах под воздействием временных или постоянных водотоков

$V_i = F$ (состав отложений, температура воды и грунтов, скорость движения воды)

Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Термоденудация

Нависающие
отложения
верхнего
горизонта

Зона транзита
талого грунта

Образование
крупных
термоцирков и
термотеррас

Вывод
сооружений из
опасной зоны



Основные криогенные процессы, представляющие опасность для инфраструктуры Арктики

Термоабразия берегов

Развивается в сильнольдистых, легкоразмываемых многолетнемерзлых дисперсных породах при тепловом и механическом воздействии волн

Существуют два метода математического описания процесса: 1) моделирование влияния волн; 2) моделирование блоковых обвалов



Разрушение сооружений, попадающих в зону или его части

Вывод сооружений из опасной зоны

Группа процессов, не имеющих полных аналогов в природе:

Техногенное отопление и засоление

$$F_{\tau 1} > F_{\tau 1} + I$$

$N =$ проектная прочность
фактическая прочность



$$F_{\tau 1} > F_{\tau 1} + I$$

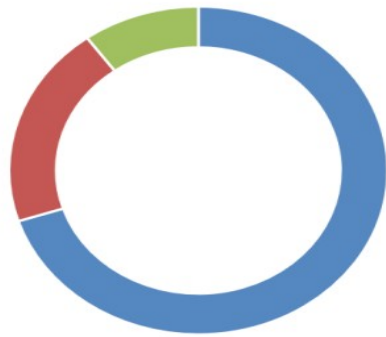
Для конструкций:

$N =$ проектная прочность
фактическая прочность



$$F_u = \gamma_t \gamma_c (R_A + \sum R_{af,i} A_{af,i})$$

Оценка современного состояния фундаментов инфраструктурных объектов в Арктике



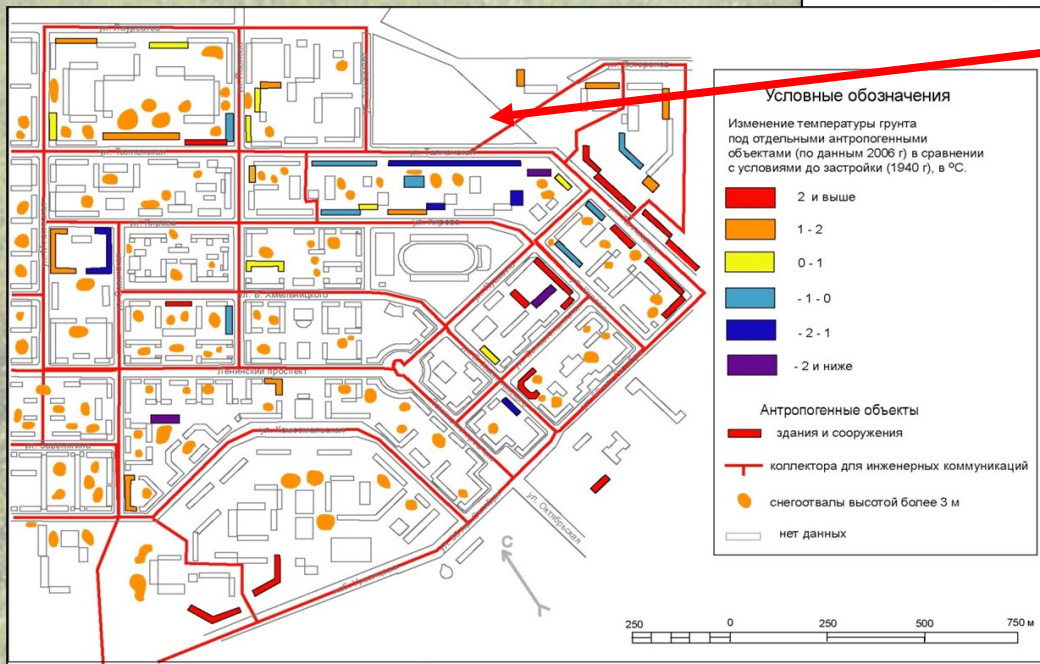
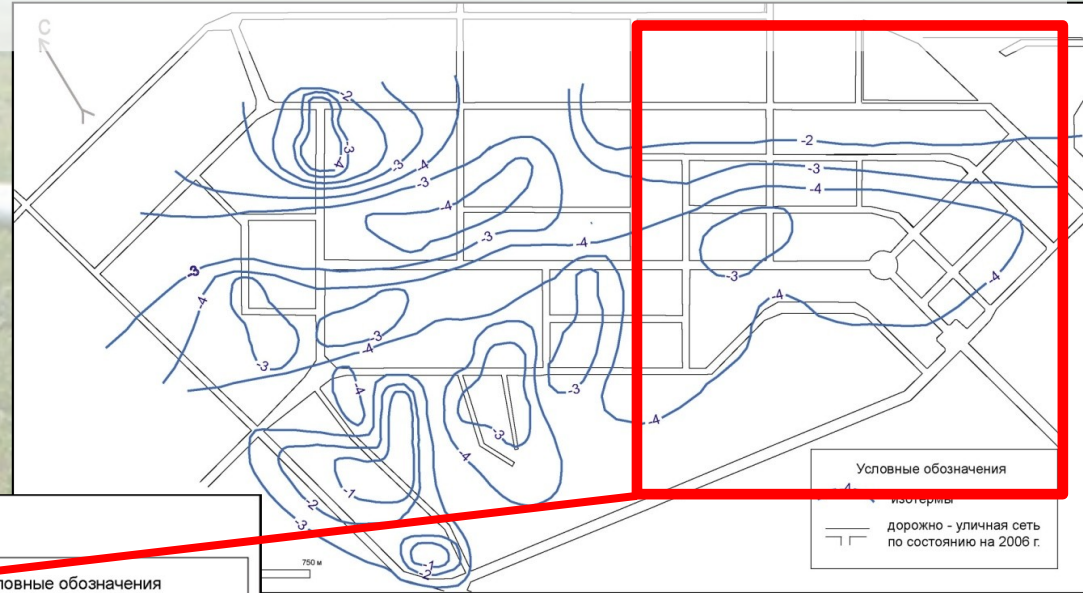
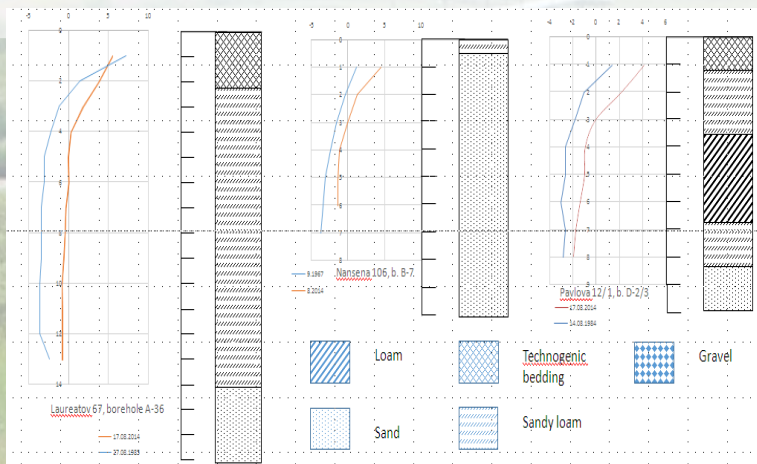
Состояние вмероженных фундаментов
70% - деградация
20% - стабильное состояние
10% агградация



Около 75% всех опор сооружений в Арктической зоне РФ устроены по принципу сохранения мерзлоты в период строительства и эксплуатации (I принцип СП 25.13330.2012). Результаты отклонений от проектных значений в период жизнедеятельности инфраструктуры.

Оценка современного состояния инфраструктуры

Изменение температуры грунтов на глубине 10 м в г. Норильске в настоящее время по сравнению с 1940 г. (по данным замеров УНСОФ, НПО «Фундамент» и кафедры криолитологии и гляциологии Географического факультета МГУ).



Трудоёмкая разборка деформированного 9-ти этажного жилого дома после 20 лет эксплуатации, г. Норильск.

Оценка современного состояния инфраструктуры



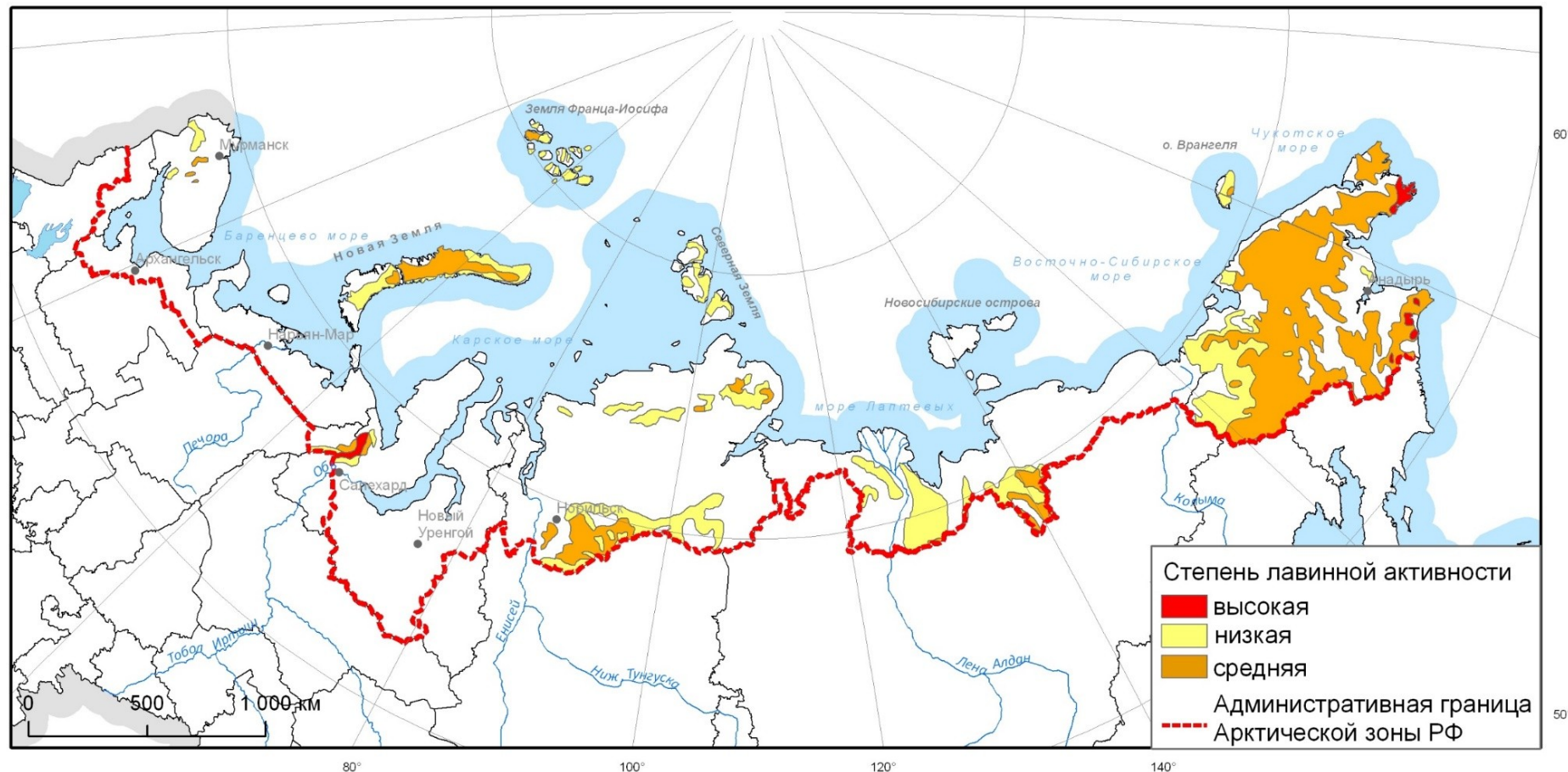
Режим снежных отложений – один из основных факторов, влияющих на состояние вечномерзлых оснований.

Перемещение снежных массивов угрожает устойчивости объектов инфраструктуры.



Оценка воздействия гляциальных процессов на инфраструктуру в Российской Арктике (на примере снежных лавин)

Площадь лавиноактивных районов в Российской Арктике превышает 850 тыс. кв. км.

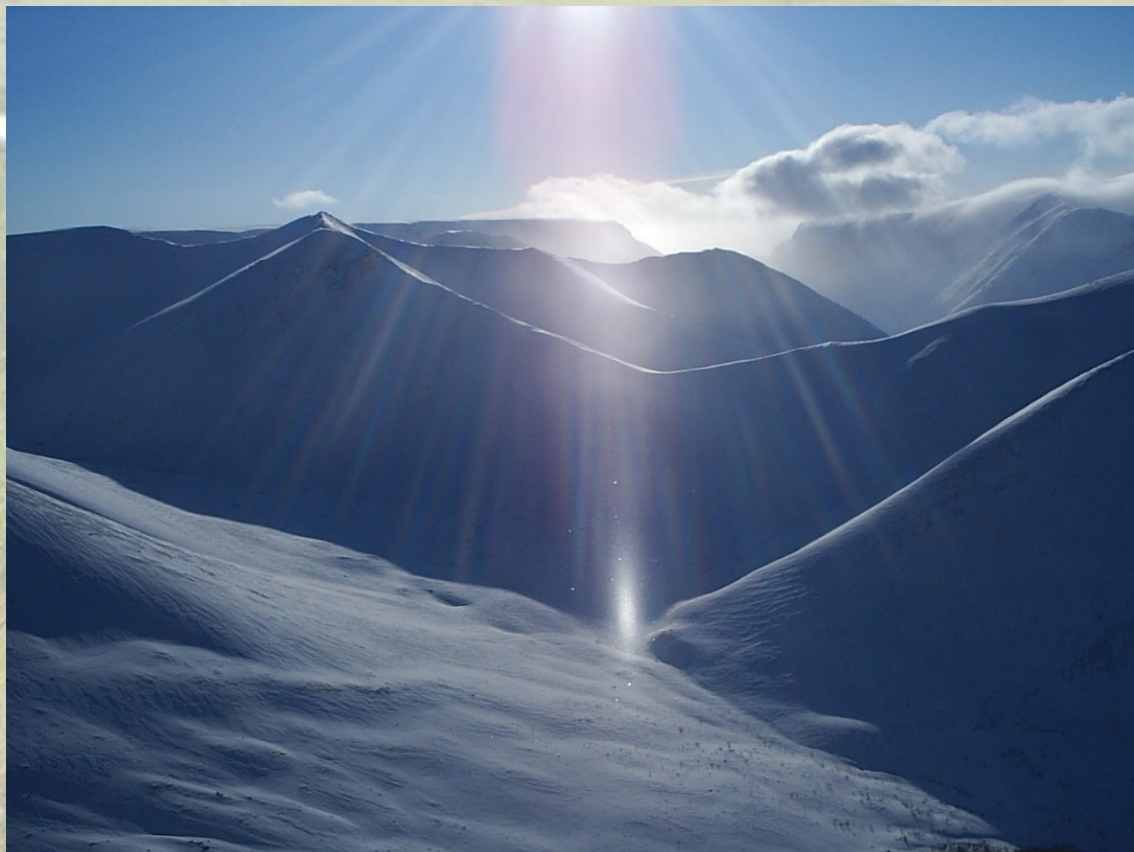


Карта составлена по материалам АЛСРМ (1997)

Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Основные черты условий лавинообразования в Арктике

- небольшая относительная высота падения лавин
- относительно небольшое количество осадков
- интенсивные метели
- низкие значения температуры воздуха
- значительная продолжительность лавиноопасного периода

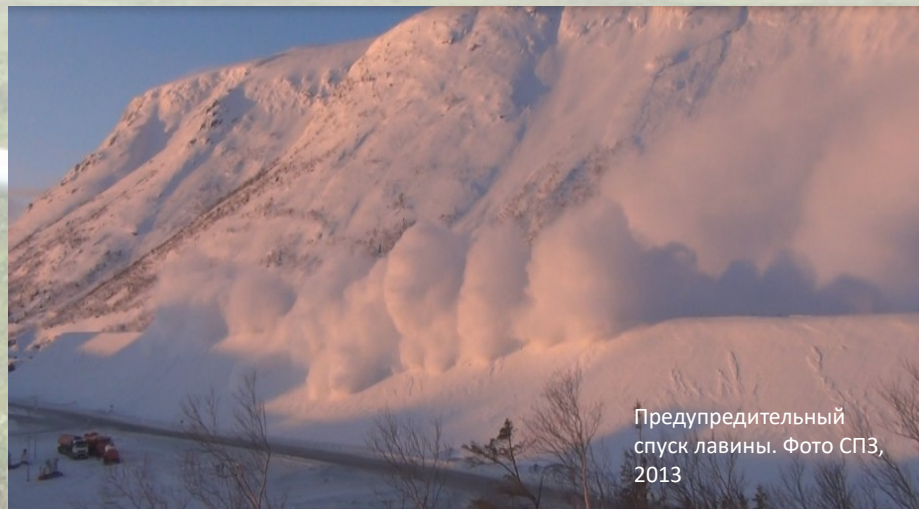


Трудная доступность определяет низкую степень изученности снежных лавин

Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Случаи гибели людей в лавинах

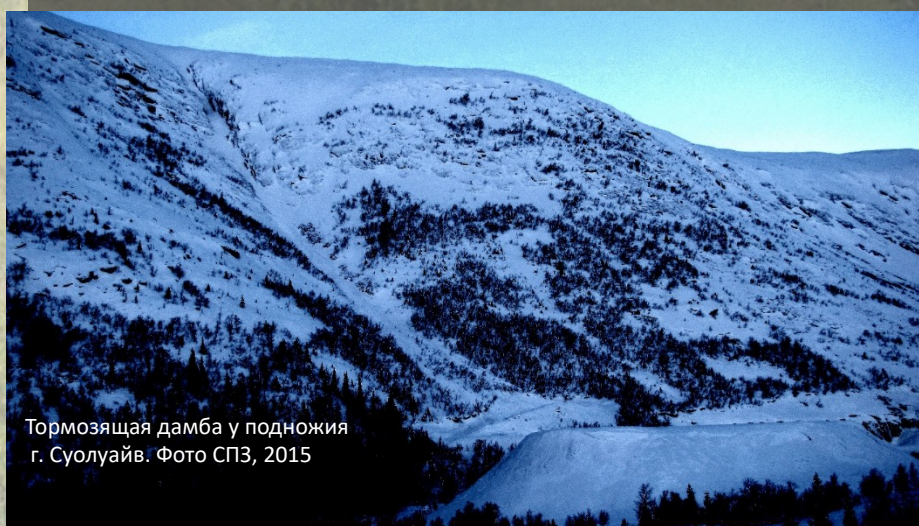
- Хибины
- Мончетундра, Ловозерские тундры
- Полярный Урал
- Плато Путорана
- Чукотский полуостров



Предупредительный
спуск лавины. Фото СПЗ,
2013



Снеговоздушное облако лавины
18.02.2016. Фото Вахмистрова Б.Б.

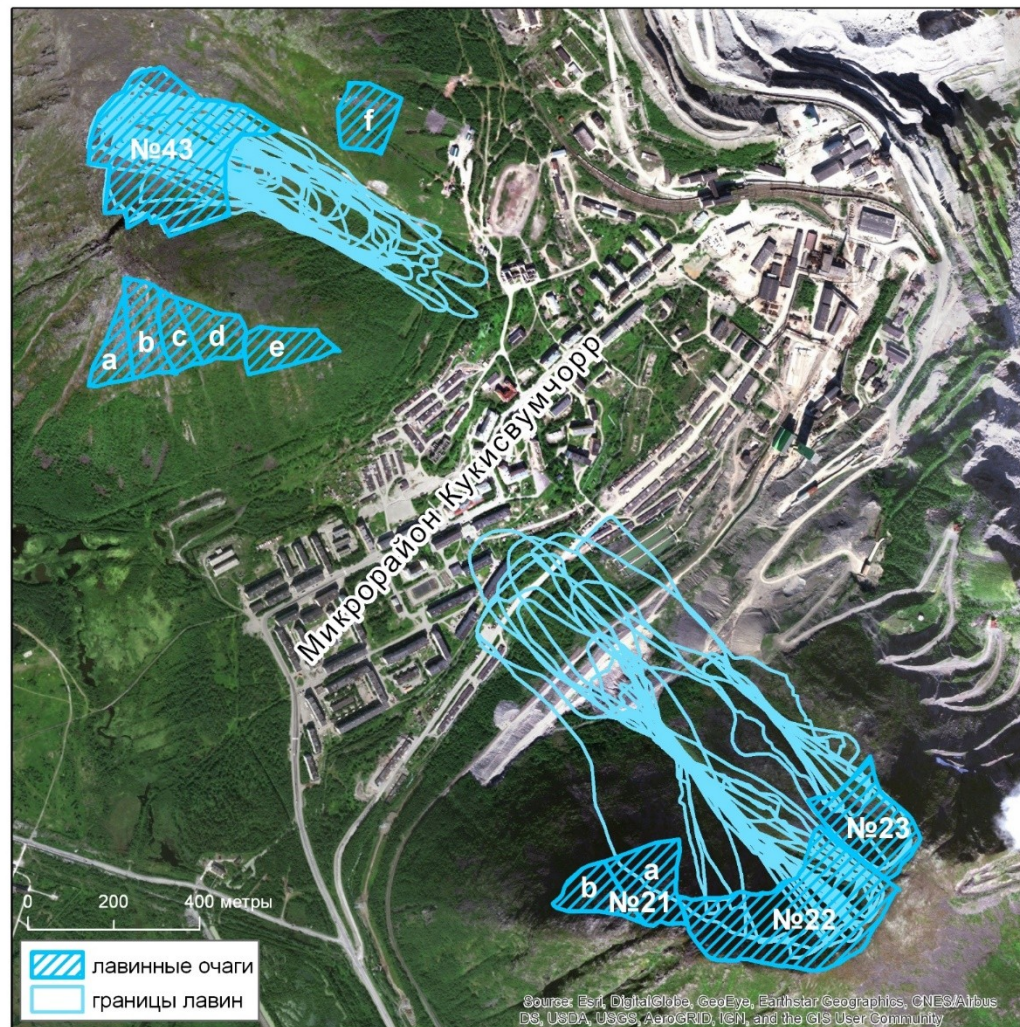


Тормозящая дамба у подножия
г. Суолуайв. Фото СПЗ, 2015

Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Зонирование по степени лавинной опасности, выражаемой через повторяемость и давление лавин, г. Кировск, Хибины

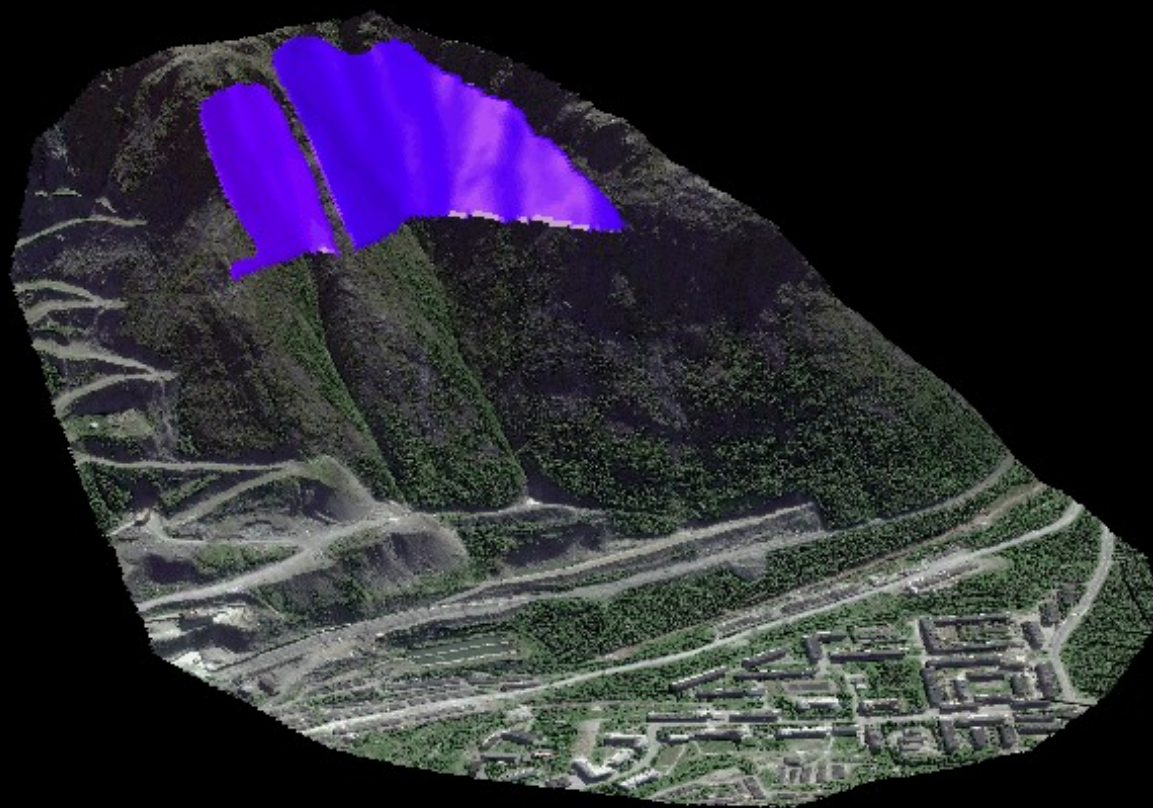
- ❑ Анализ данных фактических наблюдений с 1930-х гг.
- ❑ Оценка толщины отрыва лавин определенной повторяемости в лавинных очагах, угрожающих г. Кировск
- ❑ ArcticDEM (разрешение 2 м)
- ❑ Моделирование снежных лавин в программе RAMMS (Christen et al., 2010; Bartelt et al., 2017)



На основе результатов моделирования установлено, что в лавиносборах, расположенных на горе Юкспор, возможно формирование лавин с еще более разрушительными характеристиками по сравнению с достигнутыми, представляющих опасность для жилых домов, расположенных в зоне их воздействия.

Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Пример результатов моделирования лавин в программе RAMMS при наличии противолавинной дамбы (г. Кировск)



Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Примеры критериев градации зон по степени лавинной опасности
(T — период повторяемости, лет; I — сила удара, кПа)

McClung, 2005; Cappabianka et al., 2008

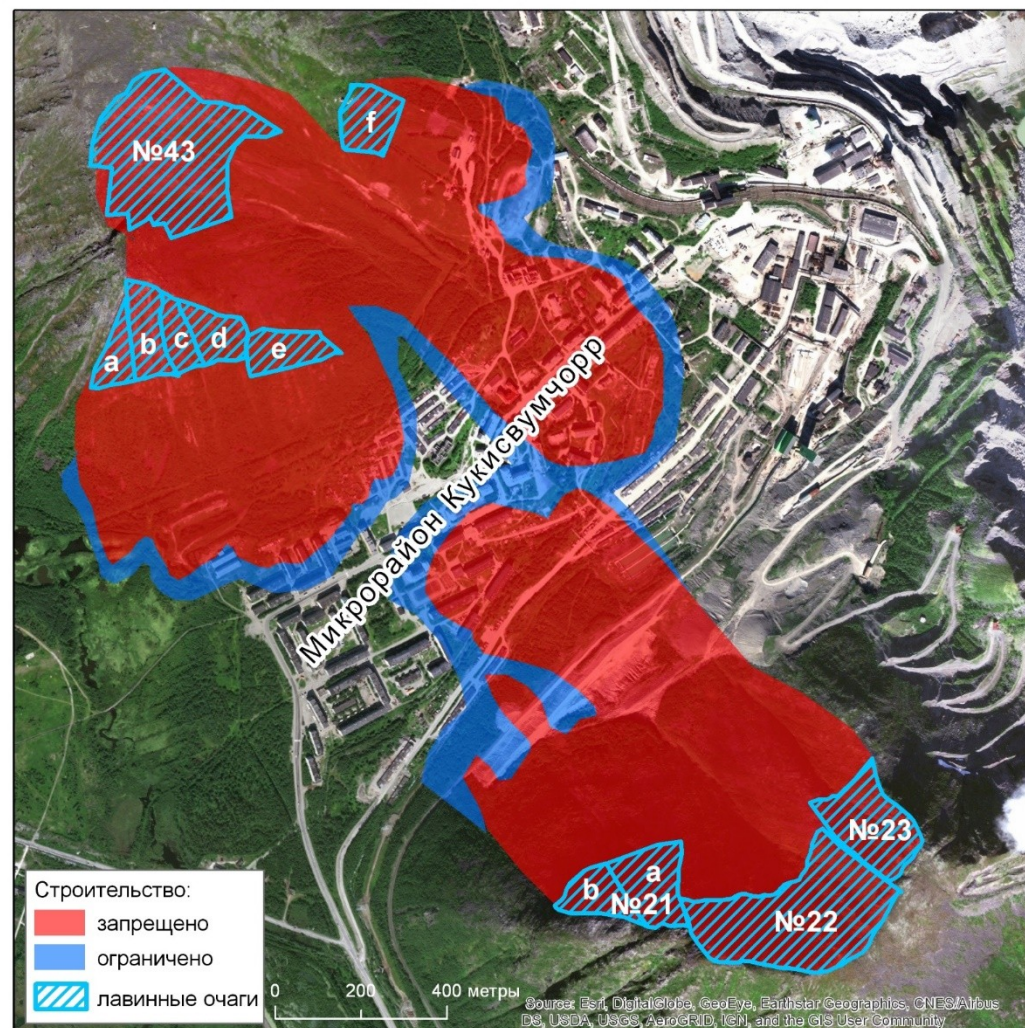
Оценка воздействия снежных лавин на инфраструктуру в Российской Арктике

Зонирование по степени лавинной опасности, выражаемой через повторяемость и давление лавин, г. Кировск

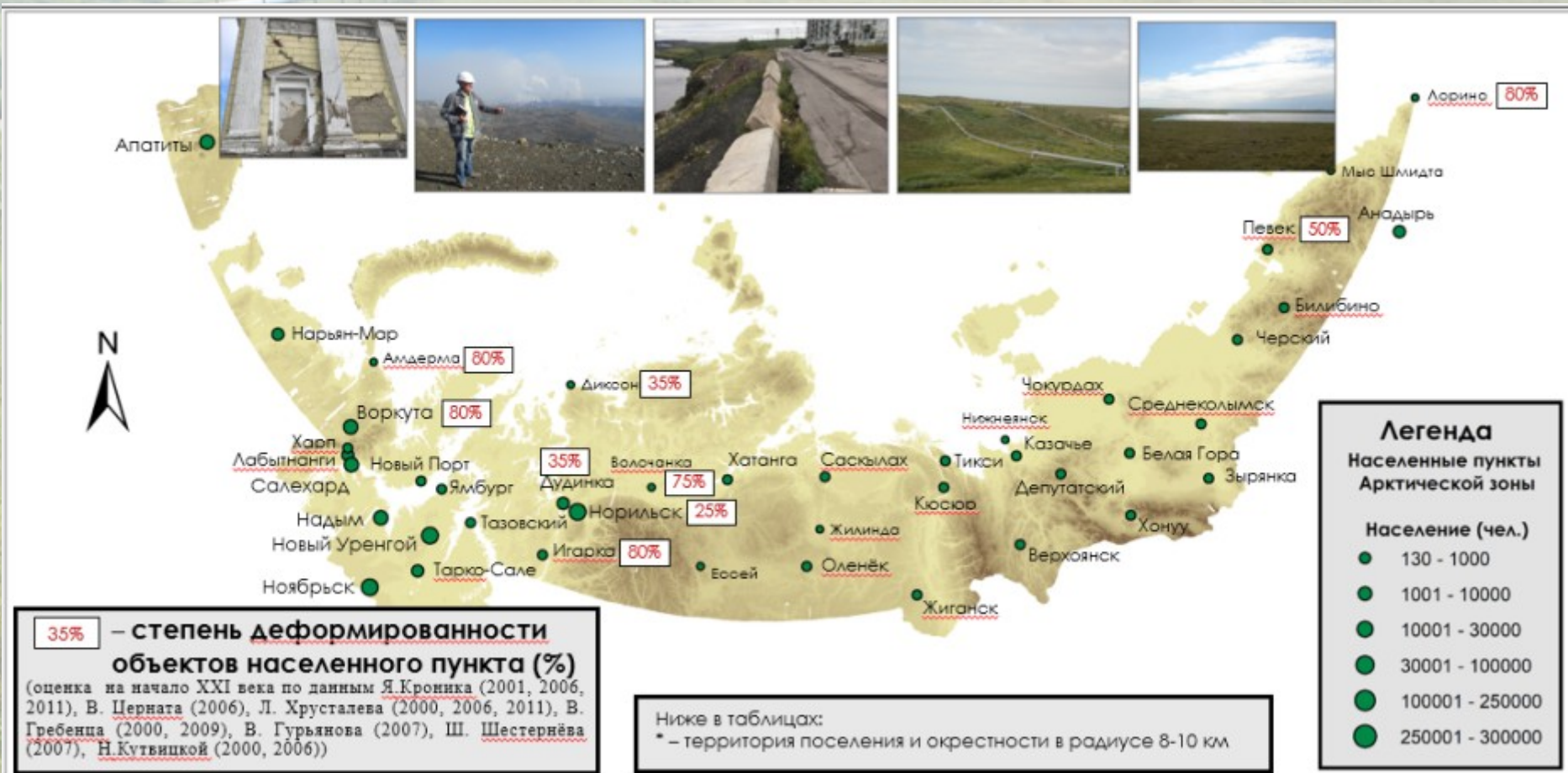
Критерии (T — период повторяемости, лет; I — давление, кПа) выделения лавиноопасных зон

Зона (степень лавинной опасности)	Характеристика зоны
красная (высокая)	$T \leq 300, I \geq 30$; $T < 30, I \leq 30$
голубая (средняя)	$10 \leq T \leq 300, I < 30$ (для сухих лавин $T < 30, I \leq 3$)

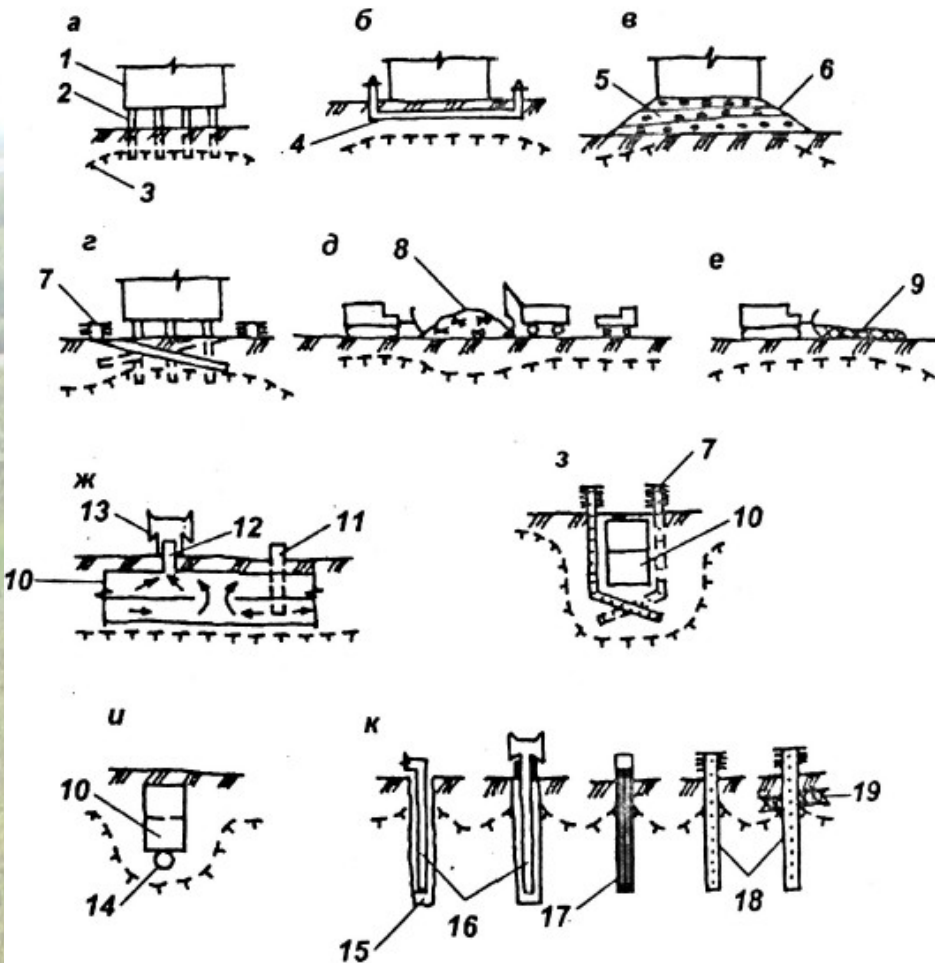
На основе анализа составленного в работе плана лавиноопасных зон установлено, что в черте микрорайона Кукисвумчорр города Кировск большое количество объектов инфраструктуры (включая жилые пятиэтажные дома) расположено в красной зоне с высокой степенью лавинной опасности, строительство в которой, согласно швейцарским правилам, запрещено.



Особенности современного состояния инфраструктуры



Методы управления мерзлотной обстановкой

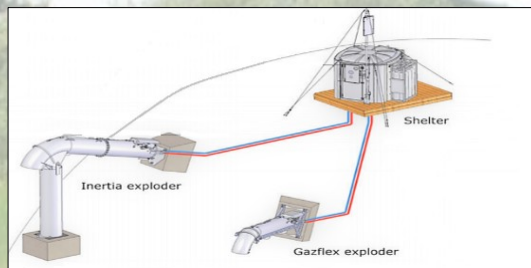


Парожидкостные термоустановки,
Норильск

1 – здание; 2 – фундамент, 3 – верхняя граница вечномёрзлого грунта; 4 – вентилируемые трубы или каналы; 5 – подсыпка; 6 – слой гидроизоляции; 7 – парожидкостные СОУ с горизонтальными отводами; 8 – снег; 9 – теплоизолирующий материал; 10 – двухъярусный подземный коллектор; 11 – воздухоприточная шахта; 12 – воздуховытяжная шахта; 13 – воздушно-конвективный охладитель; 14 – принудительно-вентилируемая полость; 15 – скважина; 16 – воздуховод; 17 – жидкостная СОУ; 18 – парожидкостная СОУ; 19 – зеротор или слой теплоизоляции

Противолавинные мероприятия и сооружения: примеры

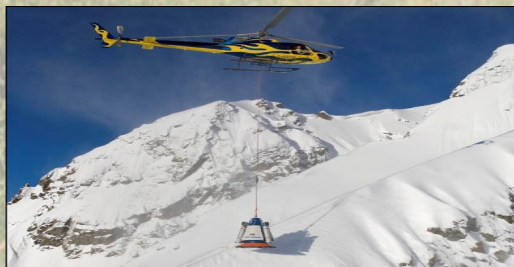
Профилактические



Система «GAZEX»



Система «Аваланчер»



Система «Дейзи Белл»

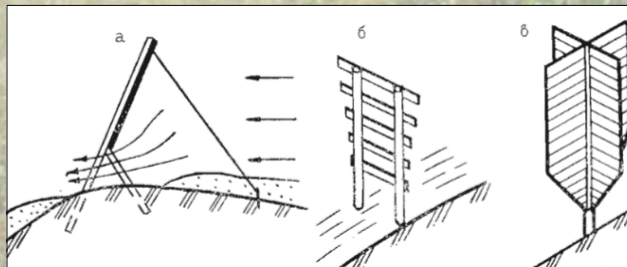
Лавинопредотвращающие



Снегоудерживающие заборы



Террасирование склонов



Снеговывдувающие конструкции

Лавинозащитные



Лавинорез



Отбойная дамба



Лавинотормозящий клин

Выводы

- На сложные природные ландшафтно-мерзлотные условия накладываются разнообразные техногенные воздействия, что вызывает разновеликие, разномасштабные, разновременные изменения вечномерзлых оснований
- Криогенные и гляциальные процессы при взаимодействии с инфраструктурой приобретают особую интенсивность и зачастую вызывают существенные деформации зданий и сооружений. По нашей оценке деформированы не менее 30% объектов
- Расчеты и моделирование показали, что применение наиболее распространенного метода управления мерзлотной обстановкой (применение холодных проветриваемых подполий) показывает свою эффективность, за исключением континентальных малоснежных районов
- Применение рассмотренного в работе подхода к зонированию территории по степени лавинной опасности при проведении территориального планирования позволит выбирать полностью безопасные или наименее опасные из возможных местоположений под строительство новых объектов инфраструктуры, что приведет к снижению стоимости капитального строительства и положительно отразится на эффективности противолавинных мероприятий в горных районах Арктики.

Основные публикации по теме доклада:

Ванштейн Б. Г., Стрелецкая И. Д., Письменюк А. А. [Геосистемы берегов Карского моря в условиях изменяющегося климата](#) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3(39). — С. 73–86. doi: 10.25283/2223-4594-2020-3-73-86

Гребенец В. И., Толманов В. А., Хайрединова А. Г., Юров Ф. Д. [Проблемы складирования твердых отходов в криолитозоне](#) // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии — Вып. 20 Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. — Москва: РУДН, 2018. — С. 227–234.

Гребенец В. И., Толманов В. А., Хайрединова А. Г., Юров Ф. Д. [Проблема размещения отходов в Арктических регионах России](#) // Проблемы региональной экологии. — 2019. — № 3. — С. 63–67. doi: 10.24411/1728-323X-2019-13063

Гребенец В. И., Толманов В. А., Юров Ф. Д., Хайрединова А. Г.
[Роль геохимического состава сезонно-талого слоя в экологической обстановке на Таймыре](#) // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии — Вып. 22 Геоэкологические аспекты реализации национального проекта Экология. — Москва: РУДН, 2020. — С. 180–187.

Гребенец В. И., Юров Ф. Д., Толманов В. А., Хайрединова А. Г.
[Формирование техногенных каменных глетчеров из отвалов породы в горнодобывающих районах](#) // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. — Вып. 21 Эколого-экономический баланс природопользования в горнодобывающих регионах. — Пермь: ПГНИУ, 2019. — С. 394–400.

Кизяков А. И., Стрелецкая И. Д., Гребенец В. И., Бадю Ю. Б.
[Активизация опасных природных процессов в районах распространения крупных залежей подземных льдов в условиях меняющегося климата Арктики](#)
// Материалы XIV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 11–14 декабря 2018 г. — Москва: ООО Геомаркетинг, 2018. — С. 268–272.

Кизяков, А. И., Стрелецкая, И. Д., Савенко, А. В., Крайнюкова, И. А., Токарев, И. В.
[Химический, изотопный и газовый состав однолетнего морского льда по данным кернов дрейфующих станций БАРНЕО за 2013–2015 гг.](#)
// Лед и снег. — 2019. — 59(3). — 363–376. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-387

Толманов В. А., Гребенец В. И., Юров Ф. Д. [Оценка негативного влияния криогенных процессов на инфраструктуру ЯНАО](#) // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26–29 ноября 2019 г., г. Москва, 26–29 ноября 2019 г. — М.:ООО Геомаркетинг,

Основные публикации по теме доклада:

Турчанинова А.С., Коровина Д.И., Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г.

[Оценка эффективности противолавинных мероприятий в лавиноопасных районах России](#) // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26–29 ноября 2019 г. — М.: ООО Геомаркетинг, 2019. — С. 198–203.

Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Глазовская Т.Г. [Влияние снежных лавин на инфраструктуру в российской Арктике](#) // Геориск. — 2019. — 13(3). — С. 60–68. doi: 10.25296/1997-8669-2019-13-3-60-68

Юров Ф. Д., Гребенец В. И.

[Несущая способность вечномёрзлых грунтов оснований объектов в нефтегазоносном Таз-Хетско-Енисейском регионе при потеплении климата](#)

// Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2019. — № 1(102). — С. 74–81.

Dvornikov Y. A., Leibman M. O., Khomutov A. V., Kizyakov A. I., Semenov P. B., Bussmann I., Babkin E. M., Heim B., Portnov A., Babkina E. A., Streletskaia I. D., Chetverova A. A., Kozachek A., Meyer H.

[Gas-emission craters of Yamal and Gydan peninsulas: a proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes](#) // Permafrost and Periglacial Processes. — 2019. — 30(3). — P. 146–162. doi: 10.1002/ppp.2014

Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E., Pushkarev V., Stanilovskaya Y.

[Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences](#) // Remote Sensing. — 2020. — 12(14). — 2182. doi: 10.3390/rs12142182

Oblogov G. E., Vasiliev A. A., Streletskaia I. D., Zadorozhnaya N. A., Kuznetsov, A. O., Kanevskiy M. Z., Semenov P. B.

[Methane concentration and emission in dominant landscapes of typical tundra of western Yamal](#) // GEOSCIENCES. — 2020. — 10(10), 412. doi: 10.3390/geosciences10100412

Shepelev A.G.; Kizyakov A., Cherepanova A., Fedorov A., Syromyatnikov I., Savvinov G.

[Sub-Surface Carbon Stocks in Northern Taiga Landscapes Exposed in the Batagay Megalump, Yana Upland, Yakutia](#) // Land. — 2020. — 9(9). — 305. doi: 10.3390/land9090305

Streletskaia, I. D., Vasiliev, A. A., Oblogov, G. E., Streletskiy, D. A. [Methane content in ground ice and sediments of the Kara Sea coast](#) // GEOSCIENCES. — 2018. — 8(12). — 434. doi: 10.3390/geosciences8120434