

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования**

**«ЗАПОЛЯРНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО»**

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК АРКТИКИ

№12 2022

Норильск 2022

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК АРКТИКИ

Научно-практический журнал

№12 2022 год

Редакционная коллегия:

Главный редактор **С.Г. Виноградова**, к.филос.н., проректор по науке и стратегическому развитию
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Заместитель главного редактора **О.Н. Демченко**, к.филос.н., доцент, доцент кафедры философии,
истории и иностранных языков Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Члены редколлегии:

Добжанская О.Э., доктор искусствоведения, доцент, профессор кафедры искусствоведения
Арктического государственного института культуры и искусства (г. Якутск)

Елесин М.А., к.т.н., доцент, зав. кафедрой строительства и теплогазоснабжения
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Бременко В.А., д.т.н., профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладной
геомеханики и конвергентных горных технологий» Московского горного института НИТУ МИСиС

Машкин Н.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры инженерных проблем экологии
Новосибирского государственного технического университета

Носова О.В., к.с.-х.н., доцент, зав. кафедрой металлургии цветных металлов Заполярного государственного
университета им. Н.М. Федоровского

Олейникова Н.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии цветных металлов
Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета

Петухова Ж.Г., д.э.н., доцент, профессор кафедры экономики, менеджмента и организации производства
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Пилипенко С.С., к.т.н., доцент, зав. кафедрой технологических машин и оборудования
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Потапенков А.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Сазыкин В.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры применения электроэнергии
Кубанского государственного аграрного университета (г. Краснодар)

Склянов В.И., к.т.н., доцент, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Федотова О.Д., д.п.н., профессор, зав. кафедрой «Начальное образование» Донского государственного
технического университета (г. Ростов-на-Дону).

Шигалугов С.Х., д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой физико-математических дисциплин
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Журнал входит в базу данных (реферативный журнал) ВИНТИ

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Издатель и учредитель: ФГБОУВО «Заполярный государственный
университет им. Н.М. Федоровского»

Компьютерная верстка *Т.В. Телелева*

При оформлении обложки использовано фото *А. Харитонова*

Адрес редакции:

663310, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7

ФГБОУВО «Заполярный государственный университет
им. Н.М. Федоровского».

Редакция журнала.

Тел. (3919) 47-39-44. Факс (3919) 42-17-41.

Адрес в Интернете: www.norvuz.ru

E-mail: rio_ngii@norvuz.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Бусыгин И.Г., Кульдеев Е.И., Волков А.Б., Хайрутдинова Д.Д.

Исследования комплексной переработки хвостов обогащения хромового сырья класса 10–160 мм методом капсулирования в композитный серобетон марки GreenCrete™ 5

Трофимов В.И., Гуляев В.И.

Быстровозводимая взлетно-посадочная полоса для Арктических зон..... 10

Власов А.Н., Прошин М.В., Исайкова Т.В.

Перспективы использования МКЭ-комплекса ANSYS и его строительного модуля CivilFEM в расчетах оснований сооружений, сложенных мерзлыми и оттаивающими грунтами..... 16

Королев М.В.

Перспективные методы определения механических свойств многолетнемерзлых грунтов.....23

Нак Г.И., Черкасов А.М., Шепитько Т.В.

Организационно-технологические решения при строительстве транспортных объектов в геоэкстремальных условиях Арктической зоны..... 34

Попова А.А., Еремеева Е.А., Власова Ю.В., Никитина Т.В.

Методы геотехнического мониторинга при изменении геокриологических условий территории..... 44

Трофимов В.И., Егоров А.Р., Хитрич Г.А.

Сборные дорожные плиты для Арктических зон..... 51

Губина Н.А., Вакуленко Т.И., Рагимова Р.К.

Север – начало успешного строительства на многолетней мерзлоте.....57

Царапов М.Н.

Трансформация оснований зданий в криолитозоне в связи с глобальным изменением климата: проблемы и пути решения..... 64

Громов С.А., Елесин М.А., Машкин Н.А., Беспалов А.С.

Стабилизирование крупноформатной древесины для малоэтажного домостроения и реставрации памятников деревянного зодчества..... 73

Брушков А.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Малкова Г.В.

Структура и параметры геокриологического мониторинга..... 78

Харченко И.Я.

Устранение сверхнормативных осадочных деформаций зданий и сооружений в условиях растепления многолетнемерзлых грунтов.....89

CONTENTS

<i>Busygin I.G., Kuldeev Ye.I., Volkov A.B., Khairutdinova D.D.</i>	
Investigations of the complex processing of 10–160 mm chrome raw material tailings by the method of encapsulation in GreenCrete™ composite sulfur concrete.....	5
<i>Trofimov V.I., Gulyaev V.I.</i>	
Pre-built runway for the Arctic zones.....	10
<i>A.N. Vlasov, M.V. Proshin, T.V. Isaykova</i>	
Prospects of the use of the finite element complex ANSYS and its construction module CivilFEM in the calculations of structures composed of frozen and thawing soils.....	16
<i>Korolev M.V.</i>	
Promising methods for determining the mechanical properties of permafrost soils.....	23
<i>Nak G.I., Cherkasov A.M., Shepitko T.V.</i>	
Organizational and technological solutions of transport facilities construction in the geoextreme conditions of the Arctic zone.....	34
<i>Popova A.A., Ereemeeva E.A., Vlasova Yu.V., Nikitina T.V.</i>	
Methods of geotechnical monitoring when changing geocriological conditions of the area.....	44
<i>Trofimov V.I., Egorov A.R., Khitrich G.A.</i>	
Preface road plates for Arctic zones.....	51
<i>Gubina N.A., Vakulenko T.I., Ragimova R.K.</i>	
North – the beginning of successful construction on permafrost.....	57
<i>Tsarapov M.N.</i>	
Transformation of building substrates in the cryolithozone due to global climate change: problems and solutions.....	64
<i>Gromov S.A., Yelesin M.A., Mashkin N.A., Bepalov A.S.</i>	
Stabilization of large-format wood for low-rise housing construction and restoration monuments of wooden architecture.....	73
<i>Brushkov A.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N., Osokin A.B., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Malkova G.V.</i>	
Structure and parameters geocryological monitoring.....	78
<i>Kharchenko Igor Ya.</i>	
Elimination of excess sedimentary deformations of buildings and structures in conditions of thawing of permafrost soils.....	89

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 5–9.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):5–9.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 691.335

doi: 10.52978/25421220_2022_12_5–9

**ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ХВОСТОВ
ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОГО СЫРЬЯ КЛАССА 10–160 ММ
МЕТОДОМ КАПСУЛИРОВАНИЯ В КОМПОЗИТНЫЙ СЕРОБЕТОН
МАРКИ GREENCRETE™**

Игорь Геннадьевич Бусыгин¹, Ержан Итеменович Кульдеев²,
Александр Борисович Волков³, Дания Дамировна Хайрутдинова⁴

^{1,3,4}Губкинский инженерно-технический центр, Оренбург, Россия

²Институт металлургии и обогащения, Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Композитный материал серобетон производится на основе серополимерного вяжущего – модифицированной серы марки GreenCrete™ по стандарту ГОСТ Р 56249–2014. Исследованы возможности процесса образования серобетонного композита для использования хвостов обогащения хромового сырья класса 10–160 мм в качестве инертных материалов.

Ключевые слова: серобетон, серополимерное вяжущее, модифицированная сера, GreenCrete™, серобетонный композит.

Для цитирования: Исследования комплексной переработки хвостов обогащения хромового сырья класса 10–160 мм методом капсулирования в композитный серобетон марки GreenCrete™ / И.Г. Бусыгин, Е. И. Кульдеев, А.Б. Волков, Д.Д. Хайрутдинова // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 5–9. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_5–9.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**INVESTIGATIONS OF THE COMPLEX PROCESSING OF 10–160 MM
CHROME RAW MATERIAL TAILINGS BY THE METHOD
OF ENCAPSULATION IN GREENCRETE™
COMPOSITE SULFUR CONCRETE**

Igor G. Busygin¹, Yerzhan I. Kuldeev², Alexander B. Volkov³, Daniya D. Khairutdinova⁴

^{1,3,4}Gubkin E&TC, Orenburg, Russia.

²Institute of Metallurgy and Enrichment, Almaty, Kazakhstan.

Abstract. The composite material sulfur concrete is produced on the basis of a sulfur polymer binder – modified sulfur of the GreenCrete™ brand according to the GOST R 56249–2014 standard. The possibilities of the process of formation of a sulfur concrete composite for the use of tailings for the enrichment of chromium raw materials of the class 10–160 mm as inert materials have been studied.

Keywords: sulfur concrete, sulfur polymer binder, modified sulfur, GreenCrete™, sulfur concrete composite.

For citation: Busygin I.G., Kuldeev E. I., Volkov A.B., Khairutdinova D.D. Studies of Complex Processing of Tailings of enrichment of chrome raw Materials of class 10–160 mm by encapsulation in Composite greencreteGrade. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):5–9. (In Russ.). [http:// dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_5-9](http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_5-9).

Проблема утилизации шлама, токсичного отхода обогащения хромовой руды, нигде в мире не решена, что обусловило закрытие производства хрома в ряде развитых стран Европы и Японии [1, с. 6]. В частности, высокое содержание кальция и кремния в шламе препятствует использованию шлама в производстве огнеупорных материалов.

Основной компонент цементного клинкера агит, трехкальциевый силикат Ca_3SiO_5 , структура которого модифицирована присутствием незначительных количеств ионов Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} – даёт при гидратации нерастворимые гидросиликаты кальция. Поэтому высокое содержание оксида магния в хромовых шламах препятствует использованию шламов в производстве цемента по причине конкурентного участия оксида магния в гидратации с образованием малорастворимых гидросиликатов магния [2–5].

Однако производство композитного серобетона связано с использованием вяжущего другой природы – модифицированной серы с необходимой по стандарту ГОСТ Р 56249–2014 долей «нерастворимой серы» – метастабильной полимерной модификации. При повышенных (до 150 °C) температурах и при взаимодействии с оксидом кремния песка идут хемосорбционные процессы с участием метастабильной полимерной модифика-

ции – с образованием твёрдого композитного материала серобетон. Индустриальные отходы в этом случае выполняют функцию инертного наполнителя и структурирующую функцию в объеме каменистого тела [6; 7].

Модифицированная сера марки GreenCrete™ по ГОСТ Р 56249–2014 (модифицированная техническая сера для производства серобетона) является продуктом переработки комовой или жидкой серы блока Клауса в условиях химической конверсии. Технически сейчас не существует ограничений в производительности такого оборудования, поставляющего вяжущее для процесса производства серобетона. Модульный серобетонный завод обеспечивает изотермическое смешение модифицированной серы с инертными материалами в массовом соотношении 1:3 производительностью от 20 т/ч и более, с получением товарного серобетона, по стандарту ПНСТ 105–2016, и железобетонных изделий на его основе.

Физические и эксплуатационные свойства полученных образцов серобетона в сравнении с бетоном на портландцементе представлены в табл. 1 и зависят от инертных наполнителей: щебня и мелкодисперсных примесей, а также от эффективности удаления воздуха из объема материала в бетоносмесителе.

Таблица 1

Сравнительные характеристики серобетона GreenCrete™ и бетона на портландцементе

Показатели	Единица измерения	Бетоны на модифицированной сере		Бетон на портландцементе
		На плотных заполнителях	На пористых заполнителях	На плотных заполнителях
Средняя плотность	кг/м ³	2300–2500	1600–2000	2200–2400
Прочность при сжатии	МПа	40–90	30–50	30–50
Прочность при изгибе	МПа	10–12	7–8	8–10
Модуль упругости при сжатии	МПа	$(3,5–4,1) \times 10^4$	$(2–2,5) \times 10^4$	$(2,4–2,8) \times 10^4$
Коэффициент Пуассона	–	0,25	0,31–0,21	0,19–0,21
Коэффициент температурного расширения КЛТР	С	$(11–13) \times 10^{-6}$	$(7–9) \times 10^{-6}$	$(10–12) \times 10^{-6}$
Линейная усадка	%	0,02	–	0,02
Водопоглощение	%	0,9–1,5	0,7–1,1	1,0–3,5
Морозостойкость	Циклы	300–800	До 100	100–300
Водонепроницаемость		20–40	10–20	8–10
Истираемость	г/см	0,4–0,45	0,3–0,35	0,35–0,4
Термостойкость	С	80	80	120
Бетонирование при отрицательной температуре		Возможно		Необходим прогрев
Бетонирование под водой, в том числе морской		Возможно		Затруднено
Химическая стойкость		Высокая		Требуется защита
Отходы производства после эксплуатационного периода		Отсутствуют		Имеются

Нормативный документ ПНСТ 105–2016 предполагает следующую классификацию инертных материалов:

1. В качестве тонкого наполнителя для приготовления серобетонов следует применять продукты, получаемые из измельчением горных пород или твердых отходов промышленного производства. Кислотостойкость тонкого наполнителя должна быть не ниже 97%.

2. В качестве мелкого заполнителя для серобетонов следует применять песок по ГОСТ 8736. Кислотостойкость песка должна быть не ниже 97%.

3. В качестве крупного заполнителя для тяжелых серобетонов следует применять щебень из горных пород или щебень из гравия по ГОСТ 8267, шлаковый

щебень по ГОСТ 3344. Максимальная крупность зерен заполнителя должна быть не более 40 мм.

В распоряжении авторов для приготовления образца серобетона марки GreenCrete™ имелись хвосты обогащения хромового сырья класса 10–30 мм, то есть превосходящие по крупности песок повышенной крупности по ГОСТ 8736. Образцы индустриальных отходов, в количестве 10 и 15% от массы итоговой смеси, был подогреты с речным песком средней крупности и смешаны с модифицированной серой GreenCrete™ (по стандарту ГОСТ Р 56249–2014 с характеристиками, представленными в табл. 2.) в количестве 25% от массы итоговой смеси.

Таблица 2

Характеристики модифицированной серы GreenCrete™

Показатель	Значение
1. Массовая доля серы, %, не менее	98,80
2. Массовая доля золы, %, не более	1,0
3. Массовая доля кислот, %, не более	0,02
4. Массовая доля органической добавки-стабилизатора, %, не более	0,2
5. Массовая доля воды, %, не более	0,06
6. Массовая доля нерастворимой (толуол, 60 °С) части, %, не менее	8

При температуре 150 °С и в процессе интенсивного перемешивания были получены оба образца материала, соответственно серого и жёлтого цвета, разлиты в испытательные кубы 100 × 100 мм и отвибрированы на виброплощадке СМЖ–539.

Характеристики полученных в ходе испытаний образцов, представленные в табл. 3, позволяют сделать заключение относительно успешного капсулирования хвостов обогащения хромового сырья в количестве 15% от массы образца с получением серобетона класса М400, в

то время как при 10% содержании материалов обогащения хромового сырья был достигнут показатель М500.

Полученные результаты свидетельствуют, что при производительности модульного серобетонного завода 20 т/ч, то есть 160 тыс. т/год, масса утилизированных методом капсулирования хвостов обогащения хромового сырья 10–40 мм составит 24 тыс. т/год с выходом серобетона класса М400. Более крупные частицы хвостов обогащения хромового сырья должны быть подвержены измельчению до указанных в ПНСТ 105–2016 предельных размеров щебня для производства серобетона 40 мм.

Таблица 3

Характеристики испытаний образцов

№ п/п	Лабораторный номер	Проектный класс бетона	Дата укладки	Дата испытаний	Возраст, суток	Условия хранения образцов	Предел прочности бетона, Мпа, Rm	Требуемая прочность бетона в возрасте 28 сут., Мпа, Rm	Процент от требуемой прочности
1	441/1, жёлтый	В30	13.08.2021	15.08.2021	2	Изготовление бетона при температуре 150 °С, твердение бетона	38,0	38,4	99
2	441/2, серый	В40	13.08.2021	15.08.2021	2	при остывании в естественных условиях	51,8	51,2	101

Список источников

1. Дюсенова С.Б. Разработка технологии комплексной переработки техногенных хвостов обогащения Донского ГОКа: дисс. ... на соискание степени доктора философии. РК, Алматы, 2019. URL: <https://official.satbayev.university/download/documentPhd/13864/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5>

%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf

2. Переработка минеральной части шлаков рафинированного феррохрома с получением гранулированного пористого теплоизоляционного материала / И.В. Бондаренко,

Е.А. Тастанов, Н.М.-К. Садыков, М.Ш. Исмагулова // Комплексное использование минерального сырья. 2018. №4. С. 158–164. DOI:10.31643/2018/2018.6445.42

3. Бондаренко И.В., Тастанов Е.А., Садыков Н.М.-К. Получение инновационного теплоизоляционного материала из шлаков феррохрома // Экология и промышленность Казахстана. 2018. №1(57). С. 32–35.

4. Hydro-Chemical Method of Utilizing Mineral Part of Refined Ferrochrome Slags to Obtain Sorel's Cements for Building Materials Production / I.V. Bondarenko, Y.A. Tastanov, A.V. Roschin, N.M.-C. Sadykov // International Journal of Advanced Science and Technology (Australia). Vol. 29. No 7s (2020): Vol 29 (Special Issue) pp.08–17. Q3 sjr (2018) – 0,13.

URL: <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/9409/5198>

5. Способ переработки хромсодержащих шламов / И.В. Бондаренко, Е.И. Кульдеев, Е.А. Тастанов, Б.К. Кенжалиев, С.С. Темирова. Патент РК №30655 от 11 июля 2019 г.

6. Васильев Ю.Э. Перспективы применения серосодержащих композиционных материалов // Дороги. Октябрь. 2013. С. 96–98.

7. Физико-химические основы применения серы как материала в качестве вяжущего для сероасфальтобетона и сероцементобетона / Ю.Э. Васильев, Н.В. Мотин, И.Ю. Сарычев, А.В. Кочетков // Строительство, дизайн, архитектура: разработка научных основ создания здоровой среды обитания. 2013. С. 64–71.

References

1. Dyusenova S.B. Development of the technology of complex processing of technogenic tailings of the Don GOK enrichment: diss. ... for the degree of Doctor of Philosophy. RK, Almaty, 2019. URL: <https://official.satbayev.university/download/documentPhd/13864/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf>

2. Processing of the mineral part of refined ferrochrome slags to obtain granular porous thermal insulation material / I.V. Bondarenko, E.A. Tastanov, N.M.-K. Sadovkov, M.Sh. Ismagulova. *Complex use of mineral raw materials*. 2018; (4): 158–164. DOI:10.31643/2018/2018.6445.42

3. Bondarenko I.V., Tastanov E.A., Sadykov N.M.-K. Obtaining innovative thermal insulation material from ferrochrome slags. *Ecology and industry of Kazakhstan*. 2018; (1(57)): 32–35.

4. Hydro-Chemical Method of Utilizing Mineral Part of Refined Ferrochrome Slags to Obtain Sorel's Cements for Building Materials

Production / I.V. Bondarenko, Y.A. Tastanov, A.V. Roschin, N.M.-C. Sadykov. *International Journal of Advanced Science and Technology* (Australia). Vol. 29. No 7s (2020): Vol 29 (Special Issue) pp.08–17. Q3 sjr (2018) – 0,13. URL: <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/9409/5198>

5. A method for processing chromium-containing sludge / I.V. Bondarenko, E.I. Kuldeev, E.A. Tastanov, B.K. Kenzhaliev, S.S. Temirova. RK Patent No. 30655 dated July 11, 2019

6. Vasiliev Yu.E. Prospects for the use of sulfur-containing composite materials. *Roads*. 2013. pp. 96–98.

7. Physico-chemical bases of the use of sulfur as a material as a binder for gray asphalt concrete and gray cement concrete / Yu.E. Vasiliev, N.V. Motin, I.Yu. Sarychev, A.V. Kochetkov. *Construction, design, architecture: development of scientific the basics of creating a healthy living environment*. 2013. pp. 64–71.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 10–15.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):10–15.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья
УДК 624.21.033.6:624.131.2
doi: 10.52978/25421220_2022_12_10–15

**БЫСТРОВОЗВОДИМАЯ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНАЯ
ПОЛОСА ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ЗОН**

Валерий Иванович Трофимов¹, Вадим Иванович Гульяев²

^{1,2} Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия.

Аннотация. При возведении аэродромов в условиях Крайнего Севера необходимо учитывать суровые природно-климатические условия строительства, вечномёрзлое состояние грунтов и высокую себестоимость работ. В настоящей статье рассматриваются вопросы совершенствования технологии строительства взлетно-посадочных полос аэродромов в сложных инженерно-геологических условиях Арктических зон. Предложена новая оригинальная конструкция взлетно-посадочной полосы свайно-эстакадного типа повышенной устойчивости, позволяющая отказаться от значительного объема грунта для отсыпки насыпи с сохранением грунтового основания в мерзлом состоянии.

Ключевые слова: винтовые сваи, высокольдистый грунт, строительство взлетно-посадочных полос.

Для цитирования: Трофимов В.И., Гульяев В.И. Быстровозводимая взлетно-посадочная полоса для Арктических зон // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 10–15. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_10–15.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

PRE-BUILT RUNWAY FOR THE ARCTIC ZONES

Valery I. Trofimov¹, Vadim I. Gulyaev²

^{1,2}Tver State Technical University, Tver, Russia.

Abstract. When constructing airfields in the Far North, it is necessary to take into account the harsh natural and climatic conditions of construction, the permafrost state of the soil and the high cost of work. This article discusses the issues of improving the technology of construction of airfield runways in difficult engineering and geological conditions of the Arctic zones. A new original design of a pile-trestle type runway of increased stability is proposed, which allows to abandon a significant amount of soil for filling the embankment with the preservation of the soil base in a frozen state.

Keywords: screw piles, high-silt soil, construction of runways.

For citation: Trofimov V.I., Gulyaev V.I. Pre-erected runway for Arctic zones. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):10–15. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_10–15.

Одним из важнейших условий эффективного обустройства северных территорий является ускоренное строительство транспортной инфраструктуры. При этом эффективное освоение уникальных и стратегически важных для нашей страны месторождений, расположенных в удаленных районах Арктики, а также надежная их защита невозможны без применения новых технологических и конструктивных решений при строительстве широкой сети гражданских и военных аэродромов.

Можно выделить четыре основные составляющие проблемы, негативно влияющие на эффективность аэродромного строительства в Арктических зонах: широкое распространение структурно-неустойчивых при оттаивании высокольдистых тонкодисперсных грунтов; отсутствие в достаточном количестве кондиционных грунтовых материалов для отсыпки площадок и насыпей; использование технологий и технических решений, не отвечающих в полной мере условиям и современным требованиям строительства на таких сложных грунтах; сезонность выполнения строительных работ и высокая их стоимость.

Решение проблемы повышения эффективности строительства взлетно-посадочных полос (ВПП) на высокольдистых тонкодисперсных грунтах в Арктических зонах предлагается осуществлять на комплексном подходе с созданием технологии по ускоренному их возведению.

Это комплексное техническое решение эффективно использовать в случае отсутствия в достаточном количестве кондиционных грунтовых материалов, используемых для отсыпки дорожных, аэродромных насыпей и других площадок, но при широком распространении некондиционных тонкодисперсных высокольдистых грунтов, с учетом возможного залегания в основании насыпей пластично-мерзлых грунтов и многожильных льдов, то есть при невозможно-

сти обеспечения надежного функционирования ВПП в таких сложных условиях строительства.

При этом решение проблемы базируется на **трех новых концепциях**:

- предусмотреть возможность исключения или полного отказа от затратных технологических операций по устройству искусственного грунтового основания под ВПП;
- предусмотреть возможность использования сборочной технологии возведения ВПП из отдельных готовых конструкций и узлов;
- предусмотреть возможность в автоматическом режиме постоянно поддерживать ВПП в устойчивом состоянии.

Высокая технологичность строительства ВПП обеспечивается применением новой технологии ускоренного его возведения за счет исключения сложной и дорогой технологической операции – создания искусственного грунтового основания, а также использования готовых модульных конструкций, что снижает, соответственно, и стоимость строительства. Для этого за основу была принята технология свайно-эстакадного строительства на слабых грунтах, которая была опробована в Томской области [1].

Предлагаемая технология реализуется за счет использования специальных винтовых микросвай под ВПП (а.с. №777573) [2] и применения сборочной технологии при ее возведении из отдельных конструкций [3].

Высокая технологичность функционирования аэродромного комплекса обеспечивается возможностью в автоматическом режиме постоянно поддерживать ВПП в устойчивом состоянии за счет использования оригинальной управляемой системы термостабилизации грунта на основе использования электрических микрохолодильников Пельтье и датчиков температуры, установленных на винтовых микросваях, с возможностью автоматического поддер-

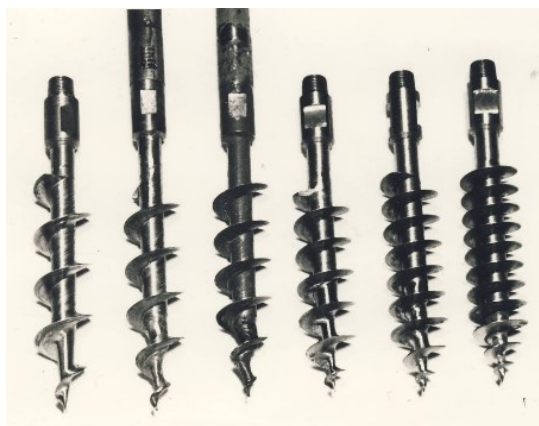
жания температурно-реологического состояния природного основания ВПП по заданной программе.

Данный оригинальный комплекс технических решений обеспечивает:

- **на этапе строительства:**
 - значительное сокращение сроков и стоимости строительства ВПП;
 - повышение устойчивости – надежности работы ВПП;
 - возможность использования технологии быстро возводимых конструкций ВПП в суровых природно-климатических условиях строительства на основе отказа от чисто строительной технологии и перехода к использованию более эффективной технологии надземной сборки готовых сопрягаемых конструкций;
 - повышение технологичности и экологичности строительства ВПП;
- **на этапе функционирования:**
 - возможность более быстрого и качественного выполнения ремонтных работ по обслуживанию ВПП;
 - возможность в автоматическом режиме постоянно поддерживать безопасное температурно-реологическое состояние грунта вокруг винтовых микросвай и работу ВПП в устойчивом состоянии.

В ТвГТУ были выполнены многочисленные испытания на мерзлых органоминеральных грунтах по оценке несущей способности винто-лопастных зондов, как моделей винтовых микросвай (рис. 1) [4].

а)



б)

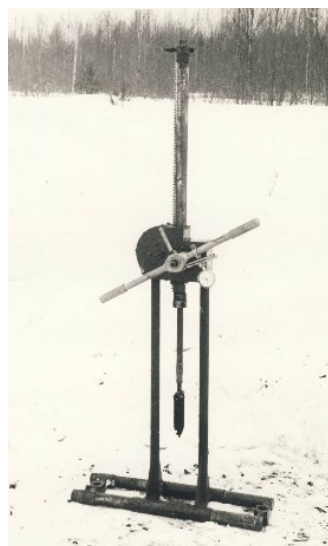


Рис. 1. Цилиндрические винтовые микросвай:
а – их испытание на задавливание;
б – выдергивание на пластично-мерзлых грунтах

Изучено влияние геометрии, формы и размеров винто-лопастных зондов на их несущую способность. По результатам испытаний были выбраны оптимальные размеры винтовых микросвай: длина 100–120 мм (без учета заходной части), шаг 20–24 мм, диаметр 36 мм. Испытания показали, что одна такая винтовая микросвая, завинченая в мерзлый торфяной грунт с температурой $-0,5 \div -1,5$ °С, обладает высокой несущей способностью на выдергивающую нагрузку порядка 14000 Н. При этом погружение винтовых микросвай в мерзлые грунты на глубину до 2 м возможно без проходки лидирующей скважины.

Было также выявлено, что эффективность использования винтовых микросвай повышается в случае их применения на мерзлых грунтах с повышенной льдистостью. А так как Арктическая зона РФ отличается широким распространением высокольдистых грунтов, то энергоемкость погружения-завинчивания свай и их износ за счет образования водяной смазки на контактной поверхности лопасти – будет минимальным.

Учитывая такую высокую несущую способность винтовых микросвай при их

небольших размерах, а также их высокую технологичность — возможность вручную производить погружение-завинчивание в мерзлый грунт, было предложено их использовать в качестве кустовых опор под нефтяные резервуары [5] и ВПП.

Использование винтовых микросвай на мерзлых грунтах в кустовом исполнении позволит производить более быстрый монтаж взлетно-посадочных полос и других сооружений.

Взлетно-посадочная полоса на мерзлых грунтах монтируется и работает следующим образом (рис. 2, 3).

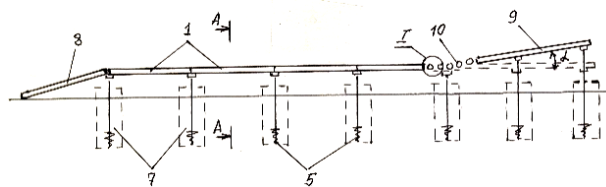


Рис. 2. Конструктивная схема взлетно-посадочной полосы

Если работы выполняются зимой, то сначала расчищается площадка от снега, после чего завинчиваются микросвай 5 в мерзлое основание 13 с формированием из них кустов 7. Затем на оголовках микросвай 5 на заданной высоте устраиваются ростверки 6 с образованием вентилируемого зазора между основанием 13 и полотном 1 ВПП (см. рис. 2). Собранные звенья из секций 2, 3, 4 полотна 1 ВПП устанавливаются краном на ростверки 6 и крепятся (рис. 3). Поверх звеньев укладываются легкие металлические плиты. В случае необходимости выполнения регулировочных и ремонтных работ соответствующая плита снимается краном или специальным подъемником и в образовавшемся окне проводятся необходимые технологические операции.

При этом на ростверках закреплены регуляторы высоты с датчиками давления, а в каждом кусте винтовых микросвай установлены датчики контроля температуры грунта, что позволяет постоянно контролировать процесс осадки

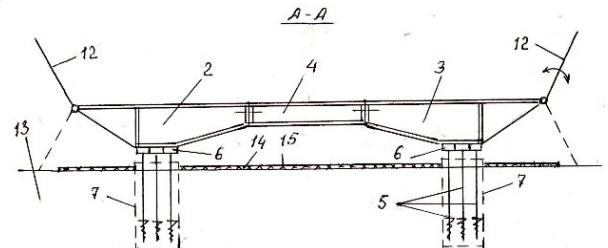
куста микросвай и температурное состояние грунта, чтобы вовремя предотвращать аварийные ситуации.

Датчики давления и температуры соединены в единую систему контроля работы кустов винтовых микросвай, которая управляется компьютером и техническим работником, отвечающим за безопасное состояние взлетно-посадочной полосы и других сооружений.

После этого на мерзлое основание укладываются теплоизоляционные плиты 14, например, пенополистирольные, и накрываются непроницаемым полотном 15.

Для улучшения работы ВПП по ее краям закрепляются поворотные навесы — экраны 12.

а)



б)

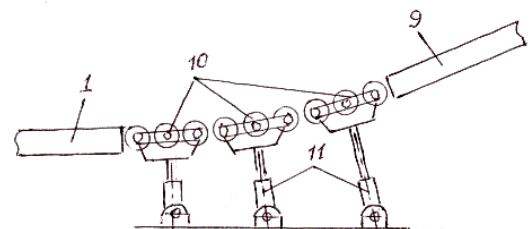


Рис. 3. Разрез ВВП: а — по А-А; б — узел I

Функционирование взлетно-посадочной полосы на мерзлых грунтах начинается с установки экранов 12 в необходимое положение. В зимний период или в другой период работы ВПП, когда устанавливается отрицательная температура воздуха, экраны 12 опускаются для предотвращения засыпания снегом мерзлого основания 13 с целью обеспечения его постоянного промораживания. В летнее время года экраны периодически поднимаются, чтобы осуществлялась естественная вентиляция основания 13.

После полной готовности ВПП самолет выруливает, например, со стояночной площадки в начало ВПП и производит по ней разгон с последующим взлетом с трамплина 9 с регулируемым углом подъема, который дополнительно повышает эффективность работы ВПП (см. рис. 3, б). При этом, так как полоса собирается из звеньев с возможностью их стыковки с минимальным зазором, движение самолета при взлете и посадке обеспечивается более плавным без динамических ударов на стыках звеньев, что позволяет повысить срок эксплуатации ВПП и самих самолетов.

Эффективность работы взлетно-посадочной полосы может быть существенно повышена, для чего ВПП оборудуется в ее начале пандусом 8 (см. рис. 2). В этом случае вспомогательные машины (для чистки полосы, тягач и др.) могут быстрее попадать на полосу 1 ВПП и освобождать ее, что минимально сказывается на графике полетов. При этом в конце взлетно-посадочной полосы 1 может быть устроен трамплин 9 с регулируемым углом подъема.

Для регулирования угла подъема трамплина 9 и более плавного его сопряжения с полотном полосы 1 используется система независимых валиков 10, которые соединяют основное полотно 1 с

трамплином 9 (см. рис. 3, б). Задавая команду гидроцилиндрам 11, например, с помощью компьютера, можно осуществлять подъем трамплина 9 на заданный угол α . В этом случае самолет имеет возможность быстрее набирать высоту и более оперативно выполнять задание. При обратной работе гидроцилиндров 11 трамплин 9 переходит в горизонтальное положение и становится логическим продолжением ВПП, удлиняя ее.

Можно приближенно оценить экономическую эффективность предложенной разработки. Например, при использовании в конструкции ВВП фундамента из кустовых опор на винтовых микросваях полностью отпадает необходимость в доставке и отсыпке грунта. Кроме этого, на каждом метре длины отсыпаемой площадки в зависимости от грузоподъемности используемых автомобилей можно исключить использование 2–4-х самосвалов типа «Камаз», что позволяет достигнуть значительного экономического эффекта.

Предлагаемый комплекс технических решений актуален на сегодняшний день, так как позволяет значительно ускорить процесс строительства не только взлетно-посадочных полос, но и самих аэродромов на мерзлых грунтах, а также других важных сооружений в Арктических зонах.

Список источников

1. Картофелев Е.О., Акимов Б.Г., Кухаренко С.А. Применение свайно-эстакадных дорожных конструкций на слабых основаниях в условиях Томской области // Вестник ТГАСУ. 2010. №4. С. 172–180.
2. Трофимов В.И. Высокоустойчивая конструкция быстровозводимого фундамента нефтяного резервуара для Арктических зон // Научный вестник Арктики. 2020. №9. С. 28–31.
3. Взлетно-посадочная полоса на мерзлых грунтах: патент 2675133. МПК: Е 01 С 5/10 / В.И. Трофимов Оpubл. бюл. №35. 2018. 8 с.
4. Трофимов В.И., Кондратьев В.Г. Геотехнология и строительство на мерзлых органоминеральных грунтах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2014. 268 с.
5. Пространственная фундаментная опора резервуара на мерзлом основании: патент №2572319. МПК: Е 02 D 27/38 / В.И. Трофимов, В.Г. Кондратьев, В.А. Бронников. Оpubл. бюл. №1. 2016. 17 с.

References

1. Kartodelev E.O., Akimov B.G., Kukharenko S.A. The use of pile-trestle road structures on weak foundations in the conditions of the Tomsk region. *Bulletin of the TSASU*. 2010; (4): 172–180.
2. Trofimov V.I. Highly stable construction of a pre-erected foundation of an oil reservoir for Arctic zones. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2020; (9): 28–31.
3. Runway on frozen soils: patent 2675133. IPC: E 01 C 5/10 / V.I. Trofimov. Publ. byul. No.35. 2018. 8 p.
4. Trofimov V.I., Kondratiev V.G. Geotechnology and construction on frozen organomineral soils: monograph. Tver: TvSTU, 2014. 268 p.
5. Spatial foundation support of a tank on a frozen base: patent No.2572319. IPC: E02D 27/38 / V.I. Trofimov, V.G. Kondratiev, V.A. Bronnikov. Publ. byul. No. 1. 2016. 17 p.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 16–22.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):16–22.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 624.139

doi: 10.52978/25421220_2022_12_16–22

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МКЭ-КОМПЛЕКСА ANSYS
И ЕГО СТРОИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ CIVILFEM В РАСЧЕТАХ
ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ, СЛОЖЕННЫХ МЕРЗЛЫМИ
И ОТТАИВАЮЩИМИ ГРУНТАМИ**

Александр Николаевич Власов¹, Михаил Викторович Прошин²,
Татьяна Викторовна Исайкова³

¹Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия.

^{2,3}Спутник, г. Москва, Россия.

Аннотация. В статье рассматриваются возможности использования модулей расчетного комплекса ANSYS (ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM) для моделирования поведения сооружений и оснований на мерзлых и оттаивающих грунтах. Расчетный комплекс ANSYS – это достойный инструмент для решения сложных задач сооружений и оснований на мерзлых и оттаивающих грунтах, т.к. обладает уникальной возможностью решения разнообразных задач математической физики.

Ключевые слова: численное моделирование, математическая физика, физические уравнения, решатели систем линейных алгебраических уравнений, графический интерфейс, задачи механики твердого деформированного тела, фильтрация, тепло- и влагоперенос.

Для цитирования: Власов А.Н., Прошин М.В., Исайкова Т.В. Перспективы использования МКЭ-комплекса ANSYS и его строительного модуля CivilFEM в расчетах оснований сооружений, сложенных мерзлыми и оттаивающими грунтами // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 16–22. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_16–22.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**PROSPECTS OF THE USE OF THE FINITE ELEMENT COMPLEX ANSYS
AND ITS CONSTRUCTION MODULE CIVILFEM
IN THE CALCULATIONS OF STRUCTURES COMPOSED
OF FROZEN AND THAWING SOILS**

Alexander N. Vlasov¹, Mikhail V. Proshin², Tatiana V. Isaykova³

¹Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

^{2,3}Sputnik, Moscow, Russia.

Abstract. The article discusses the possibilities of using the modules of the ANSYS calculation complex (ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM) to model the behavior of structures and foundations on frozen and thawing soils. The ANSYS calculation complex is a worthy tool for solving complex problems of structures and foundations on frozen and thawing soils, because it has a unique ability to solve various problems of mathematical physics.

Keywords: numerical modeling, mathematical physics, physical equations, solvers of systems of linear algebraic equations, graphical interface, problems of mechanics of a solid deformed body, filtration, heat and moisture transfer.

For citation: Vlasov A.N., Proshin M.V., Isaikova T.V. Prospects of using the ANSYS FEM Complex and its CIVILFEM Construction Module in calculations of the foundations of structures stacked with frozen and thawing soils. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):16–22. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_16-22.

Выбор расчетного комплекса для численного моделирования оснований на мерзлых (вечномерзлых) и оттаивающих грунтах является сложной задачей. Отдельной проблемой является расчет не только основания, но и сооружения на вышеуказанных грунтах. Численное моделирование основания с сооружением почти всегда эффективнее, чем их моделирование по отдельности. Таким образом, совместное моделирование сооружений с вечномерзлыми основаниями – это сложнейшая задача механики твердого деформированного тела и геомеханики, осложненная процессами замерзания и оттаивания с фазовыми переходами этих оснований. Даже предварительный анализ показывает, что в качестве вычислительных комплексов для таких расчетов должны использоваться сложнейшие МКЭ и другие междисциплинарные вычислительные комплексы.

В данной статье в качестве такого супер-комплекса для численных расчетов сооружений и оснований на мерзлых и оттаивающих грунтах предлагается использовать МКЭ – комплекс ANSYS [6–8], а также его различные модули и в том числе его строительный модуль – CivilFEM [4; 5].

В своем расширенном (общем) виде вычислительный комплекс ANSYS имеет совокупность взаимодействующих между собой модулей для решения раз-

нообразных задач математической физики в нелинейной постановке (термоупругость, теплопроводность, газогидродинамика, горение, электромагнетизм).

В МКЭ-комплексе ANSYS и его строительном модуле CivilFEM используется широкое многообразие конечных элементов:

1. Объемные элементы с различным количеством узлов и различного назначения (элементы 3D объемов с физической и геометрической нелинейностью).

2. Элементы пластин и оболочек с различным количеством узлов, различной нелинейностью и другими особенностями.

3. Стержневые элементы с различным количеством узлов, различной нелинейностью и другого функционала.

4. Специальные конечные элементы, моделирующие жесткостные, контактные, кинематические и другие условия в широком плане задач математической физики и при этом обладающие различным количеством узлов, различной нелинейностью.

Таким образом, любой процесс математической физики может быть смоделирован в расчетном комплексе ANSYS с определенной степенью точности, зависящей от имеющихся экспериментальных данных и корректности постановки расчетных задач.

Расчетный комплекс ANSYS обладает несколькими удобными интерфейсами, а геометрические модели могут быть внедрены из большого количества геометрических моделлеров (AutoCAD, SolidWorks, CATIA и т.д.).

ANSYS обладает большим количеством эффективных процедур решения систем линейных алгебраических уравнений высокого порядка.

В настоящее время доступность для отечественных пользователей (исследователей) расчетных модулей МКЭ-комплекса ANSYS ограничена санкционной неопределенностью, но закупленные ранее версии данного комплекса продолжают функционировать и вносить вклад в расчетные исследования, проводимые в России. Тем более, как показала практика, санкционные ограничения могут быть отменены или ослаблены (как это было в прежние годы).

Наиболее приемлемыми модулями для прогноза процессов, происходящих в мерзлых грунтовых основаниях сооружений, являются модули ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM.

В последнее время корпорация ANSYS (США) выпустила массу новых продуктов, куда вышеуказанные модули внедрены помимо геометрических моделлеров и других вспомогательных программ.

В данной статье рассматривается преимущественно использование модулей ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM благодаря нелинейным возможностям, которые могут наращиваться по мере усложнения решаемой задачи (при наличии соответствующих параметров материалов).

Необходимо отметить, что строительный МКЭ-модуль CivilFEM (Испания) является надстройкой к МКЭ-комплексу ANSYS, выполняющей основные расчетные процедуры для моделирования в строительном проектировании.

В модулях ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM нет локализации под мерзлые грунты, но существуют серьезные возможности по расчету задач механики твердого деформированного тела, теплопроводности с фазовыми переходами, фильтрации в пористых средах и др.

Решение задач о мерзлых и оттаивающих грунтах в смысле напряженно-деформированного состояния (НДС) и температурного режима можно свести к двум основополагающим задачам, которые будут попеременно уточняться по граничным и начальным условиям, как проходящие в одном и том же фрагменте пространства материала и которые влияют друг на друга.

Например, уточнение теплового режима основания определяет механические свойства грунтов основания и параметры самой задачи, после чего решается задача НДС этого основания. Последовательная итерация при таком процессе позволяет решить задачи о массиве мерзлых и оттаивающих грунтов в основании. В математической физике такие процессы характеризуются процедурой альтернирования Шварца-Неймана (Р. Куронт, Д. Гильберт) [1]. В этой процедуре решаются две совместные задачи, у которых расчетные области частично совпадают друг с другом и последовательное решение этих задач по отдельности с уточнением граничных условий приводит (как показали исследования) к решению общей задачи. В случае мерзлых и оттаивающих грунтов уточнение в решении задачи об основании можно проводить еще и по неким начальным условиям (по времени). Таким образом, задача так же сводится к серии последовательных приближений, что позволяют сделать МКЭ-модули ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM.

Сложность задач механики мерзлых и оттаивающих грунтов и раньше допускала такое решение задачи, но с использованием инженерных подходов как к

решению о тепловом режиме основания, так и к решению задач о НДС основания [2; 3].

Такой инженерный подход – вынужденная мера еще и по тому, что выявить начальный тепловой режим основания – задача очень сложная, как и определить меняющиеся свойства оттаивающих грунтов в основании (прочность, деформируемость, теплофизические свойства и т.д.).

Возможности решения задач прогнозирования процессов в многофазных мерзлых и оттаивающих грунтах определяются заложенными механическими моделями грунтов в модулях ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM.

В модулях ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM заложены следующие механические модели деформирования грунтов:

- для нескальных грунтов: модель Друкера-Прагера, модель Мора-Кулона, модель Кем-Клэй;
- для скальных грунтов: модель Хейка-Брауна.

В вышеуказанных МКЭ-модулях внедрены механические модели материалов других негрунтовых сред без внутреннего трения с учетом нагрузки, разгрузки, упрочнения, фактора времени про которые упоминать в этой статье не будем, но они известны из литературы.

Разумеется, что в модулях ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM можно решать задачи в линейной и нелинейной постановке, изотропной и анизотропной постановке, с учетом фактора времени. А также комбинировать использование расчетных моделей материалов.

Решения задач теплового режима материалов также многочисленны и заложены в возможности вышеуказанных модулей МКЭ-комплекса ANSYS, где температура рассматривается как фактор нагружения конструкции и массивов грунтов со всеми вытекающими попутными процессами (фазовые переходы).

Положительным моментом в комплексе ANSYS (большинство модулей) является то, что на любом этапе решения задачи исследователь может вывести результаты и с их помощью осуществить процедуру (пересчет их) по необходимым для исследователя формулам для оценки чего-либо. Это позволяет использовать процедуры, не заложенные в МКЭ-комплекс ANSYS (другие физические уравнения грунтов), и вывести результаты в достойном графическом интерфейсе ANSYS. Такая особенность МКЭ-комплекса ANSYS удобна для исполнения новых процедур исследователей применительно к сложным грунтовым основаниям, сложенным мерзлыми и оттаивающими грунтами.

Строительный модуль CivilFEM МКЭ-комплекса ANSYS адаптирует широкие возможности комплекса в расчетные процедуры строительного проектирования оснований и сооружений.

CivilFEM включает в себя:

1. Процедуры расчета металлических конструкций.
2. Процедуры расчета железобетонных конструкций, в том числе преднапряженных.
3. Процедуры расчета мостов из железобетона и металла.

Особый интерес представляют геотехнические процедуры в МКЭ-модуле CivilFEM, куда входят:

1. Определение давления грунта на балки, плиты и сооружения с учетом нелинейности и неоднородности грунтов.
2. Определение коэффициента постели фундаментов на грунтовом основании как по решению Ж. Буссинеска, так и по другим процедурам с использованием конечно-элементной модели.
3. Расчет свай и свайных фундаментов на вертикальные и горизонтальные нагрузки с учетом вертикальной и горизонтальной жесткости основания.

4. Расчет гибких подпорных сооружений с учетом поэтапности выемки котлована и нелинейных свойств грунтов в бортах котлована.

5. Расчет фильтрации в грунтовых основаниях, платформах и др. сооружениях в плоской и объемной постановках. Фильтрационное давление воды из этого расчета может быть представлено в CivilFEM как нагрузка для анализа устойчивости склонов и откосов.

6. Анализ устойчивости склонов и откосов, с применением результатов расчета методом конечных элементов или классических методов потери устойчивости склонов и откосов по кругло-цилиндрическим и ломаным поверхностям обрушения, таких как метод Терцаги, Феллениуса, Бишопа, Ямбу (обычный и модифицированный), Моргенштерна и Прайса и т.д. Любой вид закрепления и нагружения может быть введен в анализ, например, анкеровка, наличие геотекстиля, сейсмическое воздействие, давление воды в порах и т.д.

МКЭ-комплекс ANSYS и его строительный модуль CivilFEM позволяют оценивать влияние строительства новых сооружений на существующую окружающую застройку и сети.

При помощи МКЭ-модулей ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, ANSYS CivilFEM возможны расчеты на воздействии статических, динамических, вибрационных, сейсмических и др. нагрузок, а также возможно реализовывать различные методы расчета устойчивости конструкций.

На последующих рисунках представлены результаты расчета оснований и сооружений в вышеуказанных модулях МКЭ-комплекса ANSYS.

На рис. 1 представлен расчет основания Апарта-Отеля (модель Друкера-Прагера) (г. Москва, Гранатный переулок).

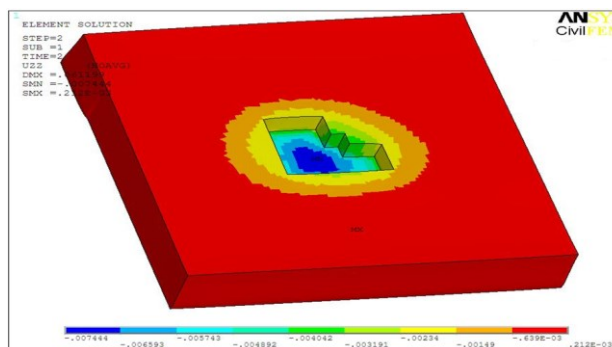


Рис. 1. Изополя осадок (в метрах) при выемке котлована и последующем догрузении под строящейся Апарта – Отель по адресу: г. Москва, Гранатный переулок, д. 6., стр. 1

На рис. 2 представлен расчет влияния строящегося здания на рядом стоящее здание (модель основания – Мора-Кулона – плоская задача), показаны деформации за цикл разгрузка – повторное нагружение – нагрузка сверх природной (г. Москва, Б. Каретный переулок).

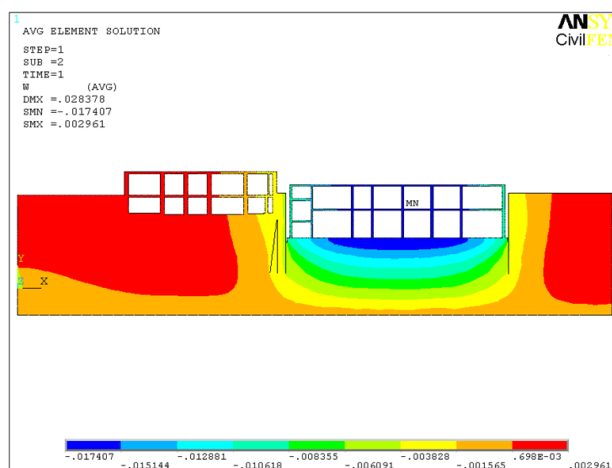


Рис. 2. Оценка влияния по осадке (в метрах) строительства здания на рядом стоящее здание по адресу: г. Москва, Большой Каретный переулок, д. 24

На рис. 3 показаны результаты расчета устойчивости склона по кругло-цилиндрическим поверхностям скольжения (метод Бишопа) (Подмосковье, район Истры).

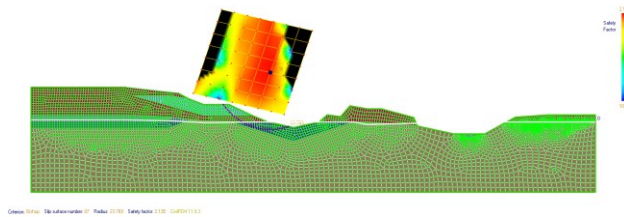


Рис. 3. Результаты расчета устойчивости склона по круговым поверхностям скольжения методом Бишопа (Московская область, Истринский район)

На рис. 4–6 показаны, соответственно, эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и горизонтальных смещений в шпунтовой трубе $d = 325$ мм, $t = 8$ мм, $L = 11,7$ м ограждения котлована здания в центре г. Москвы с одним уровнем горизонтальных распорок.

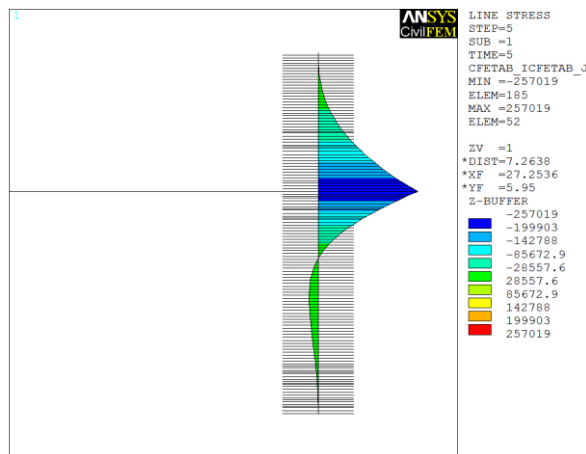


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов в шпунтовой трубе $d = 325$ мм, $t = 8$ мм, $L = 11,7$ м с одним уровнем распорок на последнем этапе выемки котлована ($t \times 10^{-4}$) $\times$ м (г. Москва, Гранатный переулок, д. 6, стр. 1)

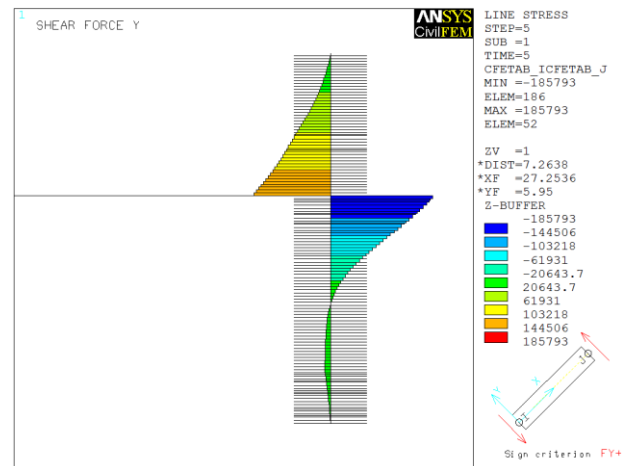


Рис. 5. Эпюра поперечных сил в шпунтовой трубе $d = 325$ мм, $t = 8$ мм, $L = 11,7$ м с одним уровнем распорок на последнем этапе выемки котлована, $t \times 10^{-4}$ (г. Москва, Гранатный переулок, д. 6, стр. 1)

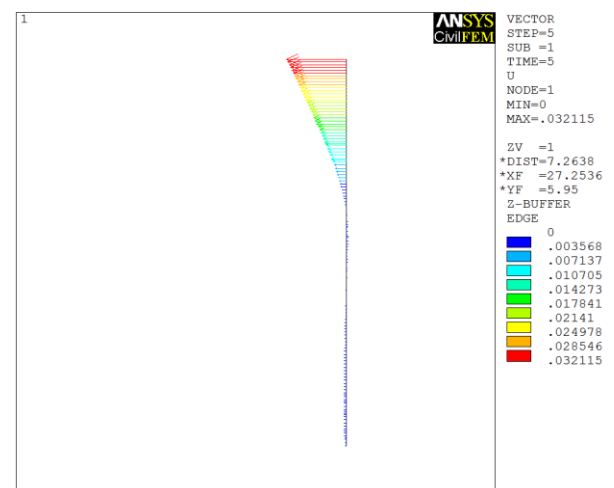


Рис. 6. Вектора перемещений (в метрах) шпунтовой трубы $d = 325$ мм, $t = 8$ мм, $L = 11,7$ м с одним уровнем распорок на последнем этапе выемки котлована, м (г. Москва, Гранатный переулок, д. 6, стр. 1)

Список источников

1. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. Т. II. М.: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1945. 620 с.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная). М.: Высшая школа, 1973. 448с.
3. СП 25.13330.2020 СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Стройиздат.
4. ANSYS/CivilFEM 14.5. User's Guide. Madrid (Spain). 2015.
5. Прошин М.В., Исайкова Т.В. Опыт применения Ansys/CivilFEM в строительных расчетах для объектов г. Москвы // Инженерно-технический журнал ANSYS SOLUTIONS. Русская редакция. М., 2007. С. 21–25.
6. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: Компьютер Пресс, 2002. 223 с.
7. Чигирев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
8. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 639 с.

References

1. Courant R., Hilbert D. Methods of mathematical physics. Vol. II. Moscow: OGIZ State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1945. 620 p.
2. Tsytovich N.A. Mechanics of frozen soils (general and applied). Moscow: Higher School, 1973. 448s.
3. SP 25.13330.2020 SNiP 2.02.04-88. Foundations and foundations on permafrost soils. M.: Stroyizdat.
4. ANSYS/CivilFEM 14.5. User's Guide. Madrid (Spain). 2015.
5. Proshin M.V., Isakova T.V. Experience of using Ansys/CivilFEM in construction calculations for Moscow facilities // Engineering and Technical journal ANSYS SOLUTIONS. Russian edition. Moscow, 2007. pp. 21–25.
6. Basov K.A. ANSYS in examples and problems. Moscow: ComputerPress, 2002. 223 p.
7. Chigirev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS for engineers: reference. manual. Moscow: Mechanical Engineering-1, 2004. 512 p.
8. Basov K.A. ANSYS: User's Guide. Moscow: DMK Press, 2005. 639 p.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 23–33.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):23–33.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья
УДК 551.345:(539.43+624.131.439)
doi: 10.52978/25421220_2022_12_23–33

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Михаил Владимирович Королев

Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия.

Аннотация. Рассматриваются новые эффективные методики, позволяющие с достаточной для практических целей точностью определить параметры прочности и деформируемости многолетнемерзлых и оттаивающих грунтов по испытаниям одного образца без его разрушения. В основу методик положена идея проф. С.С. Вялова – динамометрический метод определения прочности на одноосное сжатие. Испытания проводятся в режиме ползучести-релаксации. Разработанные методики позволяют существенно сократить количество, стоимость и время испытаний и значительно повысить их информативность.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, деградация мерзлоты, механические характеристики, ползучесть, релаксация, длительная прочность, предельные деформации сдвига, шаровой штамп, сдвиговые и трехосные испытания, несущая способность свай.

Для цитирования: Королев М.В. Перспективные методы определения механических свойств многолетнемерзлых грунтов // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 23–33. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_23–33.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**PROMISING METHODS FOR DETERMINING THE MECHANICAL
PROPERTIES OF PERMAFROST SOILS**

Mikhail V. Korolev

Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract. New effective methods are considered that allow determining the strength and deformability parameters of permafrost and thawing soils with sufficient accuracy for practical purposes by testing one sample without its destruction. The methods are based on the idea of Prof. S.S. Vyalov – a dynamometric method for determining the strength of uniaxial compression. The tests are carried out in the creep-relaxation mode. The developed methods make it possible to significantly reduce the number, cost and time of tests and significantly increase their informativeness.

Keywords: permafrost soils, permafrost degradation, mechanical characteristics, creep, relaxation, long-term strength, ultimate shear deformations, ball stamp, shear and triaxial tests, non-existent ability of piles.

For citation: Korolev M.V. Promising methods for determining the mechanical properties of permafrost soils. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):23–33. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_23-33.

Введение. В России 63% территории занимают многолетнемерзлые грунты (10,7 млн. км²). Около 75% зданий и сооружений построены по принципу сохранения вечной мерзлоты, в том числе на сваях с высоким ростверком и вентилируемым подпольем. Увеличение температуры грунтового основания всего на 1...2 °С резко снижает несущую способность свай (до 50%). Таким образом, в связи с потеплением климата в Северном полушарии, деградацией мерзлоты и изменением температуры грунтового массива многие сооружения находятся в зоне риска, о чем свидетельствует в последние годы увеличение числа аварий промышленных и гражданских объектов.

Для осуществления эффективного мониторинга таких объектов, оценки их фактической эксплуатационной пригодности, проведения геотехнических расчетов, проектирования и строительства новых сооружений необходимо располагать надежными данными механических характеристик мерзлых грунтов, причем при различных значениях отрицательной температуры. Определение механических характеристик многолетнемерзлых грунтов представляет собой сложную задачу, так как данные грунты обладают значительной изменчивостью и неоднородностью, их свойства существенно зависят от льдистости, текстуры, засоленности и значения отрицательных температур. Кроме того, они обладают ярко выраженными реологическими свойствами (значительными деформациями ползучести, снижением прочности во времени и релаксацией напряжений), что требует проведения большого числа длительных испытаний, что трудно, а иногда и невозможно осуществить на практике [5].

В этой связи необходимо искать новые подходы к проведению геомеханических исследований и разрабатывать более простые в технической реализации, эффективные и информативные методы испытаний, ориентируясь на отечественные разработки. Это тем более актуально с учетом последних политических событий и попытках ряда западных стран устроить экономическую и технологическую изоляцию России.

Классические методы определения параметров длительной прочности грунтов, обладающих реологическими свойствами (в т.ч. мерзлых грунтов), основаны на ступенчатом приложении к образцу нагрузки, измерении развития деформаций, приложении следующей ступени вплоть до разрушения образца. То есть испытания ведут в режиме контролируемой (задаваемой) нагрузки [2; 9].

Так, например, при сдвиговых испытаниях при фиксированном уровне сжимающих напряжений σ_k к образцу (целику) ступенчато прикладывают сдвигающие касательные напряжения τ . При этом каждая ступень нагрузки выдерживается длительное время, в процессе которого фиксируют развивающиеся деформации ползучести. На начальных ступенях нагружения деформации ползучести носят затухающий характер. После превышения предела длительной прочности деформации ползучести носят прогрессирующий характер. За длительную прочность принимается ступень нагрузки, при которой деформации начинают носить незатухающий характер. На рис. 1 в качестве примера приведена схема подобных испытаний на сдвиг (а) и зависимость касательных сдвиговых перемещений во времени при различных ступенях касательной сдвигающей нагрузки (б).

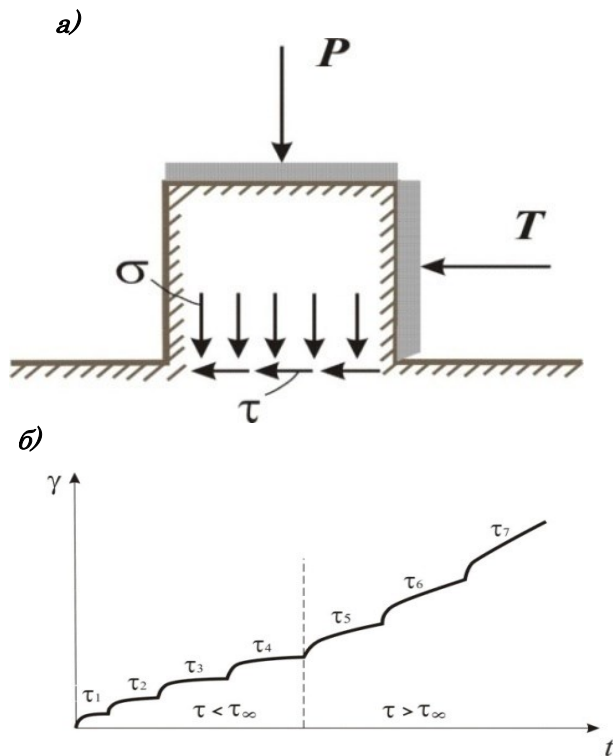


Рис. 1. Схема испытаний целика на сдвиг по традиционной методике (а) и кривые ползучести сдвиговых перемещений при разном уровне касательной сдвигающей нагрузки (б)

Существенными недостатками такого подхода к определению параметров длительной прочности для мерзлых грунтов, обладающих ярко выраженными реологическими свойствами, являются:

- значительная длительность опыта (порядка 1 месяца и более) вследствие того, что деформации ползучести развиваются и затухают крайне медленно;
- поскольку в ходе испытаний образец доводится до разрушения, при сдвиговых испытаниях для определения параметров длительной прочности φ^∞, c^∞ требуется испытать минимум два образца при различных нормальных напряжениях σ ; для учета естественной неоднородности мерзлых грунтов нормативная литература требует проведения минимум шести испытаний;
- данные методы предусматривают проведение испытаний грунтов при фиксированном его физическом состоянии, т.е. при одном значении отрицательной температуры; для определения параметров длительной прочности при

различных температурах, что часто требуется для расчетов оснований при возможном изменении температуры массива, необходима целая серия длительных испытаний, что существенно удорожает и усложняет геомеханические изыскания.

Общий вид кривых ползучести, релаксации касательных напряжений и длительной прочности мерзлых грунтов, получаемых в ходе сдвиговых испытаний, приведены на рис. 2. Для большей наглядности взаимосвязи всех переменных представим эти зависимости в виде трехмерных проекций четырехмерной функции $\tau_{пред} = f(\gamma, \sigma, t)$ [5].

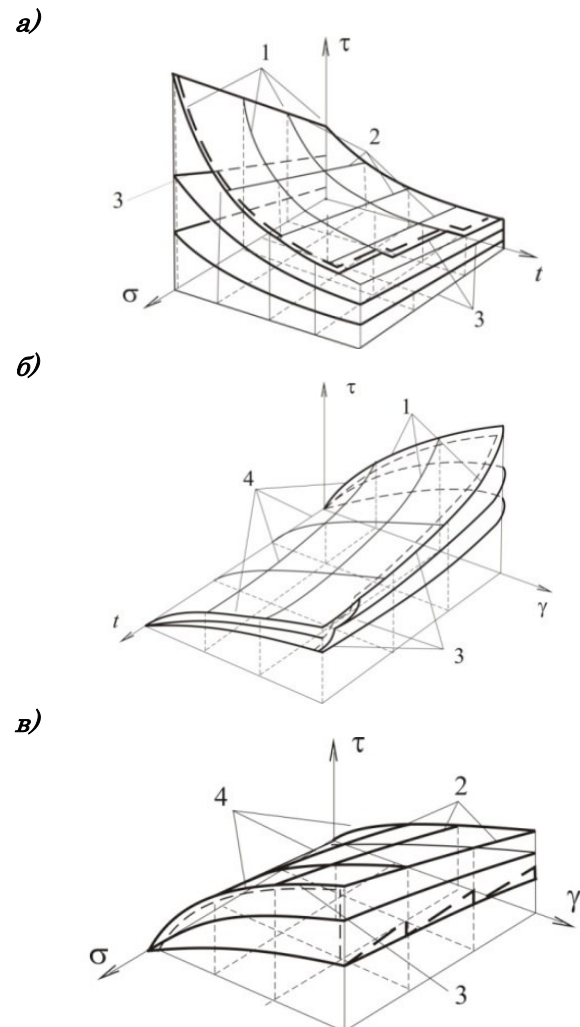


Рис. 2. а – кривые (поверхности при $\gamma = \text{const}$) длительной прочности (2), релаксации касательных напряжений (1); б – кривые (поверхности при $\sigma = \text{const}$) ползучести (4) и релаксации касательных напряжений (1); в – кривые (поверхности при $t = \text{const}$) прочности (2) и кривые ползучести (4), 3 – траектория нагружения по предлагаемой методике

На этих обобщенных графиках, в соответствующих сечениях четырехмерной фигуры, образуемых плоскостями основных координат, проявляются графики условно мгновенной и длительной прочности, затухающие и прогрессирующие деформации ползучести, графики релаксации напряжений и др. Пунктиром показана траектория нагружения при испытаниях в режиме ползучести-релаксации (ПРР), о которой речь пойдет ниже.

Новые высокоэффективные способы и методики определения параметров длительной прочности и деформируемости многолетнемерзлых грунтов основаны на испытаниях в режиме не задаваемых (контролируемых) нагрузок, а в режиме контролируемых (задаваемых) деформаций. При этом к образцу через упругий элемент задаются деформации, близкие к предельным, и далее образец испытывается в режиме релаксации.

Эти методики разрабатывались еще с 1985 г., сначала в МИСИ им. В.В. Куйбышева, затем в НИУ МГСУ и, в настоящее время, в ИПРИМ РАН [1; 4–8; 10].

Методики во многом базируются на идее, предложенной профессором С.С. Вяловым (1978), и реализованные им в так называемом динамометрическом методе определения длительной прочности грунтов на одноосное сжатие. Сущность его заключается в том, что к образцу, испытываемому на одноосное сжатие, через жесткий динамометр с помощью винта прикладывают начальное напряжение σ_0 , близкое к пределу длительной прочности, и регистрируют снижение его во времени (релаксацию) и развитие во времени деформаций образца [2]. По полученным кривым можно определить вид уравнения ползучести и значения входящих в него параметров. Принимая уравнение ползучести в форме

$$\varphi(\gamma) = \tau\psi(t), \quad (1)$$

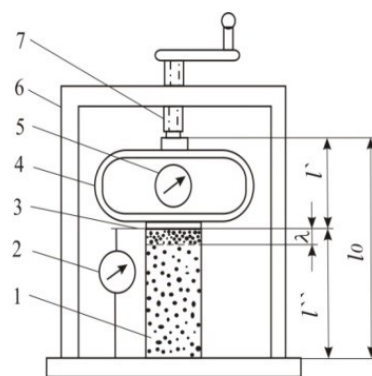
и полагая $\varphi(\varepsilon) = A_0 \varepsilon^m$, функция ползучести $\psi(t)$ определяется как

$$\psi(t) = A_0 \frac{[\varepsilon(t)]^m}{\sigma(t)}, \quad (2)$$

где $\varepsilon(t)$ – деформация образца; $\sigma(t)$ – изменяющееся напряжение динамометра, определяемое по рис. 3, б.

Стабилизацию процесса релаксации можно рассматривать как достижение равновесия между действующей внешней нагрузкой и внутренними силами сопротивления грунта. На рис. 3 представлена схема динамометрического испытания и методика ее проведения.

а)



б)

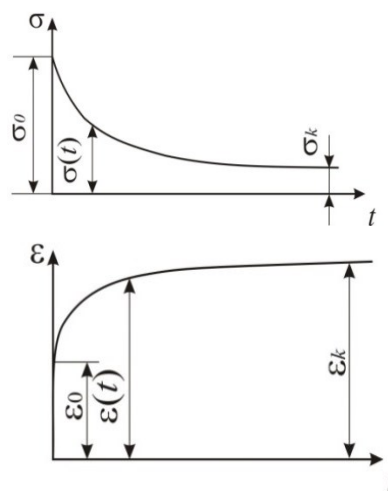


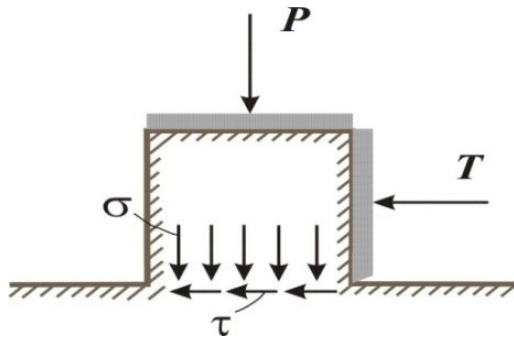
Рис. 3. а – схема динамометрического прибора: 1 – образец; 2 – датчик перемещений; 3 – штамп; 4 – жесткий динамометр; 5 – датчик перемещений динамометра; 6 – рама; 7 – винтовое нагрузочное устройство; б – результаты испытаний при разовом нагружении

Приведем примеры новых разработанных методик.

Новая методика сдвиговых испытаний. К образцу (или целику) прикладывается вертикальная сжимающая нагрузка σ_z непрерывно или ступенями,

в зависимости от программы испытаний (рис. 4).

а)



б)

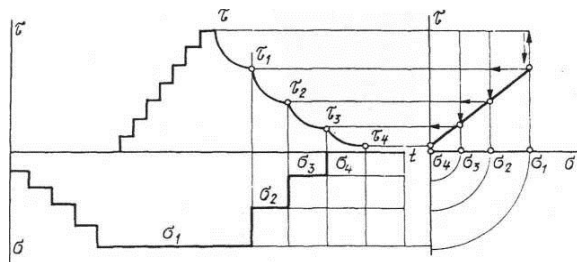


Рис. 4. а – схема испытания целика на сдвиг; б – программа нагружения и результаты испытаний

Далее к образцу (целику) ступенями или непрерывно прикладывается сдвигающая нагрузка τ . Нагружение осуществляется через упругий элемент, в качестве которого может служить динамометр большой жесткости с винтом или гидравлический домкрат.

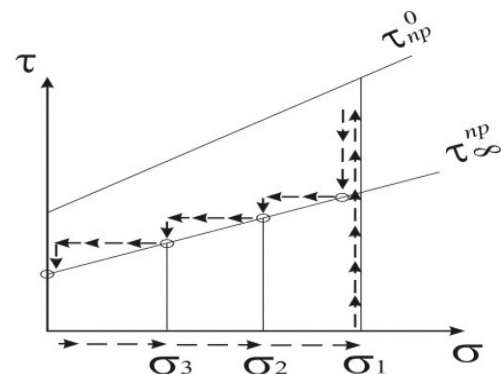
Приложение нагрузки продолжается до превышения предельных деформаций, о чем судят по ряду критериев. Далее производят сброс вертикального давления до σ_2 . Причем ступень σ_2 и последующие ступени σ выдерживаются такое время, которое необходимо для стабилизации сдвиговых напряжений τ_i и перемещений γ_i . Стабилизация сдвиговых напряжений τ_i и перемещений γ_i свидетельствует о том, что внешние сдвигающие силы τ_i пришли в равновесие с внутренними силами сопротивления породы сдвигу при данном значении сжимающих напряжений σ_2 . После этого вновь снижают сжимающую нагрузку до σ_3 . Равновесие системы при этом нарушается и восстанавливается тогда, когда сдвигающая нагрузка, вследствие процесса релаксации, уравнивается силами сопротивления породы сдвигу при

другой сжимающей нагрузке σ_3 . Далее аналогичным образом производят разгрузку вертикального давления ступенями до нуля.

В результате испытаний получают несколько пар значений σ_i и соответствующих им стабилизированных сдвиговых напряжений τ_i . По полученным данным строят график в осях τ - σ , который будет близок к кривой длительной прочности. По графику определяют параметры длительной прочности при сдвиге φ_∞ и c_∞ (см. рис. 4) [6].

Методику можно реализовать с помощью полевого сдвигового прибора ВСВ-25м. Для автоматизации процесса записи и обработки результатов можно легко оснастить нагрузочные устройства цифровыми датчиками измерения силы и перемещений и вывести сигналы на компьютер (рис. 5).

а)



б)



Рис. 5. а – зависимость $\tau_{длит} = f(\sigma)$ б – сдвиговой прибор ВСВ-25м, оснащенный устройством для автоматического нагружения, измерений и обработки данных от универсальной установки UTS-10

Новая методика испытания грунта шаровым штампом в режиме контролируемых деформаций. Для технической реализации метода разработана простая конструкция прибора. Возможно также использовать блок от полевого сдвигового прибора ВСВ для создания вертикальной нагрузки (рис. 6).

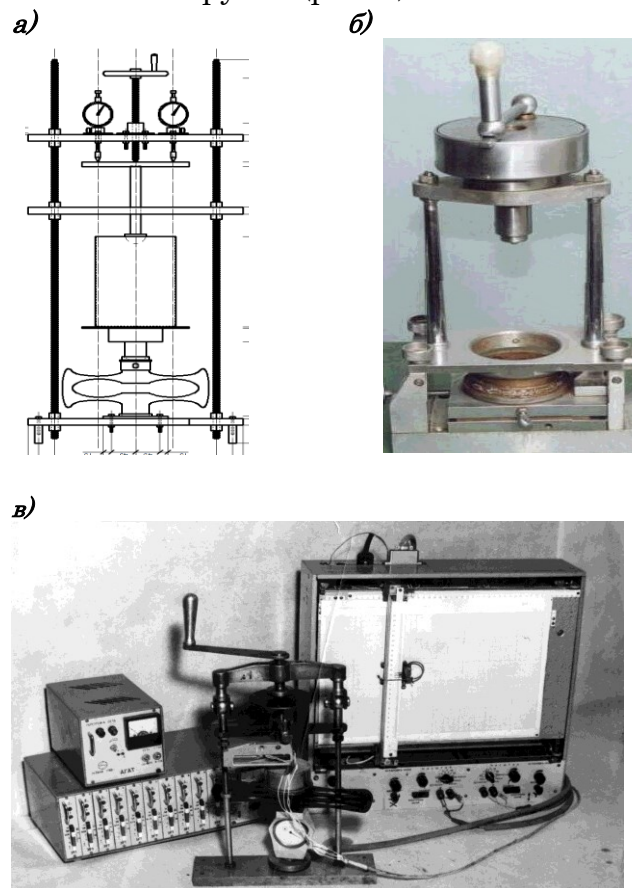


Рис. 6. Прибор шарового штампа для испытаний в режиме ползучести релаксации: а – схема прибора; б – блок для создания вертикальной нагрузки через упругий элемент от полевого сдвигового прибора ВСВ-25 м; в – автоматический прибор шарового штампа

Сущность методики заключается в том, что с помощью упругого элемента (жесткий динамометр с винтом) шаровому штампу задается осадка в пределах $0,005 < s/D < 0,1$, и далее испытания ведут в режиме ползучести-релаксации. Вследствие осадки шарика во времени за счет разжатия упругого элемента происходит уменьшение вдавливающей нагрузки до тех пор, пока система не придет в новое равновесное состояние. При этом следует отметить, что при динамометре достаточно большой жесткости

осадка шарика меняется незначительно [5; 7].

Испытания шаровым штампом в режиме контролируемых деформаций и тот факт, что в ходе опыта осадка шарового штампа не меняется и отношение s/D остается неизменным, дает возможность существенно повысить информативность испытаний и разработать новые методики:

- методика приближенного определения из опытов с использованием шарового штампа отдельно угла внутреннего трения и удельного сцепления [5];
- методика определения коэффициента вязкости грунта [5].

Новая методика испытаний шаровым штампом при различных температурах. Методика разработана для определения длительного сцепления при различных температурах методом шарового штампа и реализуется следующим образом: на выровненную поверхность образца мерзлого грунта с заданной отрицательной температурой θ °С устанавливается шаровой штамп диаметром D . Температура выбирается наиболее низкой, в диапазоне отрицательных температур, при которых требуется определить сцепление. Затем к шаровому штампу через упругий элемент большой жесткости прикладывается такая сжимающая нагрузка, чтобы относительная осадка штампа s находилась в диапазоне $0,005 < s/D < 0,1$. В качестве упругого элемента может быть использован динамометр с винтом или гидродомкрат.

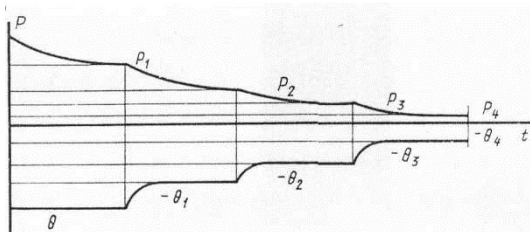
Далее образец испытывается в ползуче-релаксационном режиме, для чего перестают подкручивать винт, создающий нагрузку на динамометр, или подкачивать гидродомкрат. При этом сжимающая нагрузка будет уменьшаться вследствие развития осадки штампа и связанного с этим разжатия динамометра (или выдвижения штока домкрата). Причем при использовании упругого элемента большой жесткости незначительное увеличение осадки вы-

зовет существенное уменьшение сжимающей нагрузки. С течением времени величина падения нагрузки будет уменьшаться, и система «внешняя нагрузка–внутренние силы сопротивления» придет в равновесное состояние при данной осадке, стабилизированной нагрузке P_i и заданной отрицательной температуре θ °С. По полученным стабилизированным значениям P_i и s_i по известным формулам, например, определяют значение длительного сцепления грунта при данной отрицательной температуре θ :

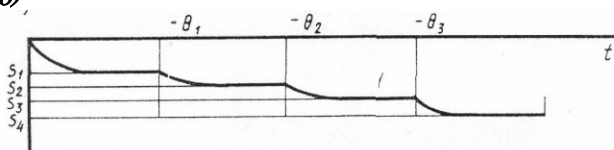
$$C = 0,18 \frac{P}{\pi D s}. \quad (3)$$

Затем абсолютное значение отрицательной температуры уменьшают до величины θ_2 . Учитывая, что сцепление тем выше, чем ниже значение отрицательной температуры, при повышении температуры (растеплении) система выйдет из состояния равновесия, сжимающая нагрузка P начнет уменьшаться за счет развития перемещений и придет в новое состояние равновесия, характеризуемое осадкой s_2 , нагрузкой P_3 и температурой θ_2 . При этом осадка s_2 близка к s_1 . По полученным значениям из выражения (1) определяют длительное сцепление $c_{ш}$ при данной отрицательной температуре θ_2 . Далее аналогичным образом производят несколько ступенчатых повышений температуры до положительных значений и определяют сцепление при этих температурах (рис. 7).

а)



б)



в)

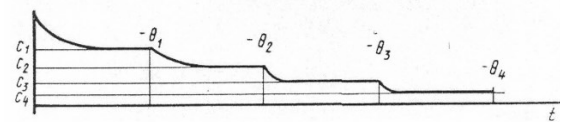
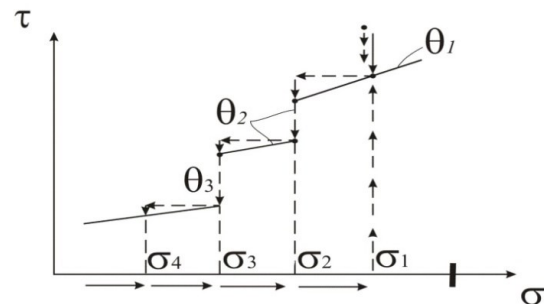


Рис. 7. Изменение сжимающей нагрузки, осадки и сцепления во времени при испытаниях шаровым штампом: а – $p = f(t)$, б – $s = f(t)$, в – $c = f(t)$

Новая методика сдвиговых испытаний для определения параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных отрицательных температурах в режиме оттаивания по результатам одного опыта. Методика позволяет в ходе одного опыта не только определить параметры длительной прочности мерзлых пород при фиксированной температуре, но и определить их значение при различных температурах в ходе одного опыта [5; 8]. Программа нагружения для получения параметров длительной прочности грунтов при различных отрицательных температурах, а также в режиме оттаивания грунтов для испытаний на сдвиг приведена на рис. 8, а, а процесс испытаний в климатической камере на сдвиговом приборе ВСВ-25м – на рис. 8, б.

а)



б)



Рис. 8. Кривые длительной прочности и программа испытаний мерзлых грунтов при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3 (а); сдвиговые испытания на приборе ВСВ-25м в климатической камере (б)

Основная идея этих испытаний заключается в том, что по вышеописанной методике испытаний на сдвиг в режиме ползучести-релаксации в некотором диапазоне вертикально сжимающих напряжений σ_1 – σ_2 испытания проводят при максимальном значении отрицательной температуры θ_1 . Получив отрезок кривой длительной прочности при данной температуре, изменяют значения отрицательных температур до величины θ_2 и при данной температуре также определяют отрезок кривой длительной прочности. Последнее испытание можно провести при значении температуры $\theta_3 = 0$.

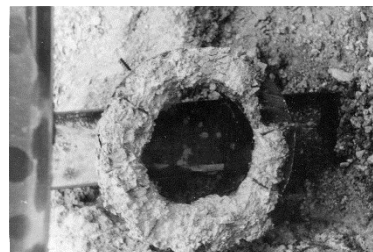
Новый способ и устройство кольцевого ребристого штампа для определения параметров прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур, в том числе в коротких скважинах. Для определения механических характеристик масштабно неоднородных грунтов требуется проведение полевых испытаний целиков различной формы – прямоугольных или кольцевых. С целью снижения трудоемкости подготовительных работ по изготовлению целика кольцевой формы, при исследовании мерзлых полускальных грунтов, слагающих борта котлована строящейся Вилуйской ГЭС-3, была разработана и апробирована инвентарная установка кольцевого нагружения – кольцевой ребристый штамп, где касательная нагрузка передавалась на массив с помощью ребер, закрепленных на металлическом инвентарном кольцевом штампе [5] (рис. 9).

С помощью кольцевого ребристого штампа можно проводить испытания в режиме ползучести-релаксации и проводить опыты по определению параметров прочности при различных температурах в ходе одного эксперимента.

а)



б)



в)

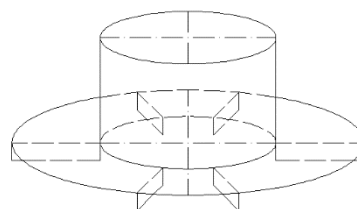


Рис. 9. Полевые испытания кольцевым ребристым штампом диаметром 0,5 м в шурфе и схема инвентарного кольцевого ребристого штампа

Приведем траекторию нагружения по определению параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в ходе одного опыта с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР (рис. 10).

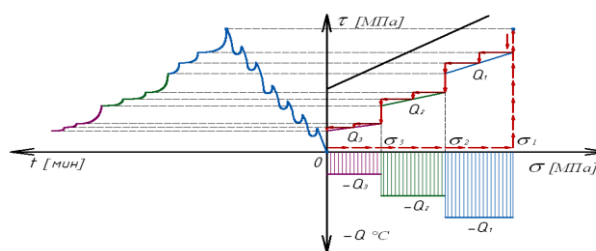


Рис. 10. Траектория нагружения по определению параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в ходе одного опыта с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР

Однако недостатком вышеописанного способа является то, что он не позволяет определить параметры прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в скважинах и открытых шурфах. Обычным ребристым штампом возможно

только проведение испытаний при фиксированном значении температуры массива, изменяя её во всей штольне или требуется проводить опыты в морозильной камере.

Если же изменять температуру мерзлого массива грунта с поверхности, с помощью нагревательных или охлаждающих устройств, под подошвой ребристого штампа, то в нем возникает неравномерное температурное поле. Это не позволяет осуществлять сдвиг кручением грунта с одинаковой температурой при помощи прямоугольных ребер штампа.

С целью усовершенствования метода были проведены численные температурные расчеты изменения температуры грунта в массиве при изменении её под кольцевой подошвой штампа. Расчеты проводились с помощью программного комплекса «Abacus». Результаты расчетов представлены в графической форме на рис.11.

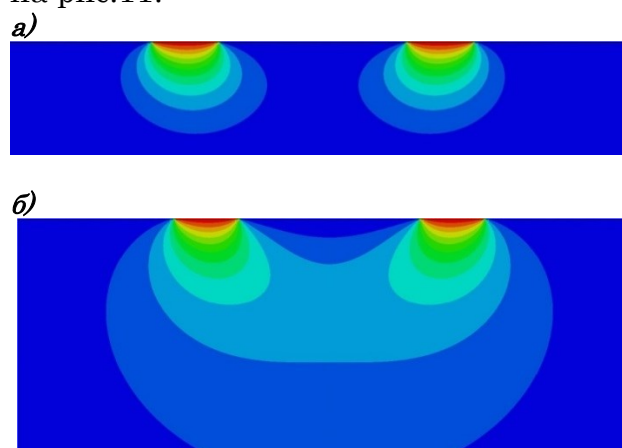


Рис. 11. Результаты численных расчетов изменения изолиний температуры в массиве мерзлого грунта при её изменении на поверхности под подошвой кольцевого штампа: *а* – начальное состояние; *б* – стабилизированное состояние

Как показали проведенные расчеты, форма линии равных температур при таком нагреве одинакова и не зависит от теплофизических свойств грунта. Это обстоятельство дает возможность существенно упростить устройство кольцевого ребристого штампа для определения механических свойств грунта при

различных температурах и отказаться от внешней и внутренней вкладок, которые были необходимы для создания равномерного температурного поля.

Было предложено ребра штампа делать не в виде прямоугольных пластин, а округлой формы, повторяющей кривую линии равных температур, которая формируется под подошвой кольцевого штампа при её нагревании. Тогда при приложении крутящей нагрузки сдвиг грунта будет осуществляться точно по границе слоя грунта с одинаковой температурой. На рис. 12 показана принципиальная схема предлагаемого устройства. Это позволяет отказаться от круговой внутренней и кольцевой внешней камер, которые служат для создания более равномерного температурного поля в грунте, упростить конструкцию устройства и применять его для испытаний грунта в коротких скважинах.

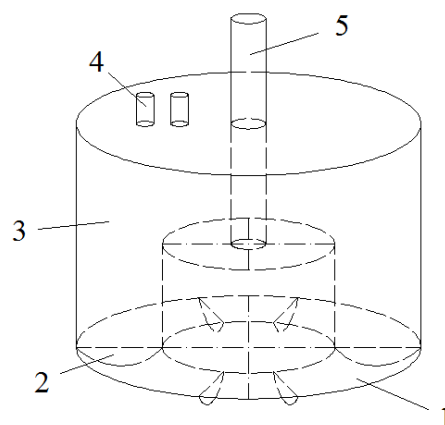


Рис. 12. Принципиальная схема кольцевого ребристого штампа для испытания мерзлых грунтов при различных температурах в коротких скважинах: 1 – подошва кольцевого штампа; 2 – овалыные ребра; 3 – бак с теплоносителем; 4 – подводящий и отводящий трубопроводы; 5 – вал штампа для передачи крутящего момента и вертикальной нагрузки

Используя общий принцип испытания в режиме задаваемых деформаций без разрушения грунта, в ИПРИМ РАН разработаны новые методики испытаний в ползуче-релаксационном режиме нагружения (таблица).

Новые методики испытаний в ползуче-релаксационном режиме нагружения, разработанные в ИПРИМ РАН

№	Название способа, методики	Определяемые характеристики
1	Методика сдвиговых испытаний в режиме ПРР, в том числе при различных температурах (сдвиговой прибор ВСВ-25м, климокамера)	Параметры длительной прочности грунта (φ_c и c_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
2	Методика трехосных испытаний в режиме ПРР, в том числе при различных температурах (стабилометр, прибор трехосного сжатия, климокамера)	Параметры длительной прочности грунта (φ_c и c_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
3	Методика испытания модифицированным прибором шарового штампа в режиме ПРР, в том числе при различных температурах (модифицированный прибор шариковой пробы, климокамера)	Длительное удельное (шариковое) сцепление (c_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
4	Методика и прибор для определения коэффициента вязкости грунта с помощью испытания способом шарового штампа в режиме ПРР (модифицированный прибор шариковой пробы, климокамера)	Коэффициент вязкости при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
5	Способ и методика испытания кручением с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР (полевая установка КРШ)	Параметры длительной прочности грунта (φ_c и c_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3 Параметры деформируемости: длительный модуль деформации (E_c) и длительный модуль сдвига (G_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
6	Методика и установка для определения параметров деформируемости грунтов плоским штампом	Параметры деформируемости: длительный модуль деформации (E_c) и длительный модуль сдвига (G_c) при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3
7	Способ, методики и установки для определения несущей способности свай (раздельно по боковой поверхности и под нижним концом), вмороженных в грунт при различных температурах	Несущая способность свай, сопротивление под нижним концом и по боковой поверхности при различных температурах θ_1 ; θ_2 ; θ_3

Выводы:

1. Разработанные методики определения механических характеристик мерзлых грунтов многократно проверены сопоставительными опытами в полевых и лабораторных условиях и успешно, со значительным экономическим эффектом, применялись на ряде значимых объектов.

2. Новые методики позволяют повысить точность испытаний, существенно сократить время их проведения и стоимость, значительно повысить их технологичность и информативность.

3. Техническая реализация методик возможна с помощью простых приборов и установок, в том числе выпускаемых отечественными производителями. Использование методик не требует высокой квалификации персонала.

4. Представляется перспективным более широкое внедрение разработанных методик в практику геомеханических исследований, что позволит справиться с новыми вызовами и успешно реализовать программу импортозамещения в сфере геомеханических исследований.

Список источников

1. Власов А.Н., Королев М.В., Королев П.М. Способ определения несущей способности свай: патент на изобретение РФ №2629508. Заявка 2015156942. Приоритет от 30 декабря 2015 г.

2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

3. Королев М.В., Власов А.Н. К вопросу о безопасной эксплуатации и эффективном мониторинге объектов в криолитозоне в условиях деградации мерзлоты // Сборник

трудов научно-практической конференции «Новое качество государственного строительного надзора в контексте реформирования контрольной и надзорной деятельности». М.: ГБУ ЦЭИИИС, 2021.

4. Королев, М.В. Развитие метода шарового штампа Н.А. Цытовича и динамометрического метода С.С. Вялова для определения параметров длительной прочности грунтов при различных температурах // *Фундаменты*. 2021. №4.

5. Королев М.В. Системные инновации в методах исследования механических свойств грунтов М.: ФГБУН ИПРИМ РАН: ООО «Сам Полиграфист», 2018. 376 с.

6. Ухов С.Б., Королев М.В. Способ определения длительной прочности горных пород. А.С. СССР № 323913, опубликовано в Б.И. №25 от 15.07. 1987.

7. Ухов С.Б., Королев М.В., Брызгалин Ю.В. Способ определения параметров длительной прочности горных пород. А.С. СССР №1610386, опубликовано в Б.И. №44 от 30.11.1990.

8. Ухов С.Б., Королев М.В., Монастырский А.Е. Способ определения длительного сцепления мерзлых грунтов. А.С. СССР №1561032, опубликовано в Б.И. №16 от 30.04.1990.

9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов (Общая и прикладная). М.: Высшая школа, 1973. 448 с.

10. Korolev P., Korolev M. Tests of piles in melted and frozen soils in creep mode: relaxation conditions, MATEC Web of Conferences. Vol. 193, 042052 (2018) doi:10.1088/1757-899X/365/4/042052

References

1. Vlasov A.N., Korolev M.V., Korolev P.M. Method for determining the bearing capacity of piles: patent for invention of the Russian Federation No. 2629508. Application 2015156942. Priority of December 30, 2015.

2. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics: textbook. M.: Higher School, 1978. 447 p.

3. Korolev M.V., Vlasov A.N. On the issue of safe operation and effective monitoring of facilities in the cryolithozone under conditions of permafrost degradation // *Proceedings of the scientific and practical conference «New quality of state construction supervision in the context of the reform of control and supervisory activities»*. Moscow: GBU CEIIS, 2021.

4. Korolev M.V. Development of the N.A. Tsytovich sham stamp method and S.S. Vyalov dynamometric method for determining the parameters of long-term strength of soils at various temperatures // *Foundations*. 2021. №4.

5. Korolev M.V. System innovations in methods of investigation of mechanical properties of soils M.: FSBI IPRIM RAS: LLC «Sam Polygraphist», 2018. 376 p.

6. Ukhov S.B., Korolev M.V. Method for determining the long-term strength of rocks. A.S. USSR No. 323913, published in B.I. No. 25 dated 15.07.187.

7. Ukhov S.B., Korolev M.V., Bryzgalin Yu.V. Method for determining the parameters of long-term strength of rocks. A.S. USSR No. 1610386, published in B.I. No. 44 dated 30.11.1990.

8. Ukhov S.B., Korolev M.V., Monastyrsky A.E. A method for determining the long-term adhesion of frozen soils. A.S. USSR No. 1561032, published in B.I. No. 16 of 30.04.1990.

9. Tsytovich N.A. Mechanics of frozen soils (General and applied). M.: Vyssaya school, 1973. 448 p.

10. Korolev P., Korolev M. Testing of piles in thawed and frozen soils in creep mode: relaxation conditions, MATEC Web of Conf. Vol. 193, 042052 (2018.) doi:10.1088/1757-899X/365/4/042052

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 34–43.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):34–43.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 625.1(985)

doi: 10.52978/25421220_2022_12_34–43

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ГЕОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ**

Григорий Игоревич Нак¹, Александр Михайлович Черкасов²,
Таисия Васильевна Шепитько³

¹Ямалтрансстрой, г. Лабытнанги, Россия.

^{2,3}Российский университет транспорта, г. Москва, Россия.

Аннотация. В статье рассмотрены технологические и организационные особенности строительства транспортных объектов в геоэкстремальных условиях Арктической зоны. Предложена методика управления надежностью при их реализации за счет технологического мониторинга.

Ключевые слова: геотехническое сооружение, технология, строительство, надежность, изменение климата, криолитозона.

Для цитирования: Нак Г.И., Черкасов А.М., Шепитько Т.В. Организационно-технологические решения при строительстве транспортных объектов в геоэкстремальных условиях Арктической зоны // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 34–43. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_34–43.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS
OF TRANSPORT FACILITIES CONSTRUCTION IN THE GEOEXTREME
CONDITIONS OF THE ARCTIC ZONE**

Grigory I. Nak¹, Alexander M. Cherkasov ², Taisiya V. Shepitko ³

¹Yamaltransstroy, Labytnangi, Russia.

^{2,3}Russian University of Transport, Moscow, Russia.

Abstract. The article considers the technological and organizational features of transport facilities construction in the geoextreme conditions of the Arctic zone. The method of reliability control during their implementation due to technological monitoring is proposed.

Keywords: geotechnical structure, technology, construction, reliability, climate change, permafrost.

For citation: Nauk G.I., Cherkasov A.M., Shepitko T.V. Organizational and technological solutions in the construction of transport facilities in geoextreal conditions of the Arctic zone. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):34–43. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_34-43.

Введение. Постоянно изменяющиеся условия внешних экономических и технических ограничений для государства обернулись трудностями в выполнении социально значимых функций, для российских бизнес-структур – с привлечением и вложением инвестиций, в результате чего создавалась принципиально новая ситуация в отношении проблемы определения источников развития страны. В условиях внешних ограничений первостепенное значение приобретают такие механизмы развития, которые опираются прежде всего на внутренние ресурсы.

Хорошим примером экономического роста в условиях внешних ограничений, экономического кризисов и влияния пандемии является китайский опыт, когда ВВП Китая показывал положительную динамику за счет активного использования прежде всего внутренних ресурсов, таких как увеличение инвестиций в высокотехнологичное производство и строительство, в том числе и инфраструктурное.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что направление использования механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП) в области инфраструктурных проектов является перспективным.

В текущих условиях одним из приоритетных направлений развития экономики России является освоение и развитие Арктической зоны страны, богатой полезными ископаемыми и являющейся стратегически важной с точки зрения обеспечения национальной безопасности. Актуальность строительства и реконструкции транспортной инфраструктуры в криолитозоне соответствует «Стратегии развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасно-

сти на период до 2035 года» [1] и основным направлениям программы социально-экономического развития Арктической зоны [2].

Федеральные органы государственной власти уделяют большое внимание развитию Арктических регионов, привлечению бизнеса в эти регионы, а также вопросам изменения климата, который оказывает большое влияние на человеческую деятельность в Арктической зоне.

Почти за столетнюю историю существования геокриологии большой вклад в развитие исследований мерзлых грунтов внесли многие как отечественные, так и зарубежные ученые. Благодаря проведенным исследованиям, к настоящему времени накоплен большой опыт по вопросам проектирования и строительства зданий и сооружений, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Тем не менее остаются не до конца решенными вопросы обеспечения надежности конструктивных и организационно-технологических решений [3] при проектировании геотехнических сооружений на многолетнемерзлых грунтах с учетом возможного изменения климата.

Анализ действующих нормативных документов. Одним из основных рисков для привлечения инвестиций в Арктическую зону была слабая проработка нормативной базы по строительству на мерзлоте. С целью его снижения в конце 2020 г. Минстроем России утвержден пакет сводов правил СП 25.13330.2020, СП 493.1325800.2020, СП 496.1325800.2020, СП 497.1325800.2020, СП 498.1325800.2020, по нормированию проведения инженерных изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений, расположенных на многолетнемерзлых грунтах [13].

Проведена большая работа по разработке и обновлению государственных стандартов по испытаниям мерзлых и оттаивающих грунтов, в их числе: ГОСТ 12248.7–2020, ГОСТ 12248.8–2020, ГОСТ 12248.9–2020, ГОСТ 12248.10–2020, ГОСТ 12248.11–2020, ГОСТ 20276.3–2020, ГОСТ 24847–2017, ГОСТ 25100–2020, ГОСТ 25358–2020, ГОСТ 26262–2014, ГОСТ 27217–2012, ГОСТ 28622–2012, ГОСТ Р 56726–2015, ГОСТ Р 59537–2021, ГОСТ Р 59540–2021, ГОСТ Р 59596–2021, ГОСТ Р 59597–2021.

Разработаны новые своды правил по проектированию и строительству транспортной инфраструктуры в районах распространения многолетнемерзлых грунтов: СП 313.1325800.2017, СП 354.1325800.2017, СП 410.1325800.2018, СП 431.1325800.2019, СП 445.1325800.2018, СП 447.1325800.2019, разработан ОДМ 218.2.094–2018.

Однако, несмотря на большое количество разработанных и выпущенных нормативных документов, в них, как и ранее, по-прежнему не освещены вопросы, связанные с оценкой надежности конструктивных и организационно-технологических решений при проектировании оснований геотехнических сооружений на многолетнемерзлых грунтах, а также технологические требования к их

строительству и реконструкции с учетом возможного изменения климата.

Организационно-технологические решения при строительстве геотехнических объектов. Опыт научного сопровождения строительства транспортных объектов в Арктической зоне, таких, например, как железнодорожной линии Обская – Бованенково – Карская, железнодорожной линии Беркабит – Томмот – Якутск, участков Северного широтного хода (СШХ), железнодорожной линии Надым – Пангоды [5; 9; 11; 12], показал, что в разработанной проектной документации на объекты организационно-технологические решения по сооружению геотехнических объектов проработаны скудно. В проектной документации (пример представлен на рис. 1) были запроектированы не типовые конструктивные решения, которые раньше нигде не были апробированы и не представлены в нормативно-технической документации (НТД); не было представлено, как их технологически реализовать на объектах с многолетнемерзлыми грунтами в основании. Одним из решений в рамках научного сопровождения стала разработка технологических регламентов на строительство объектов.

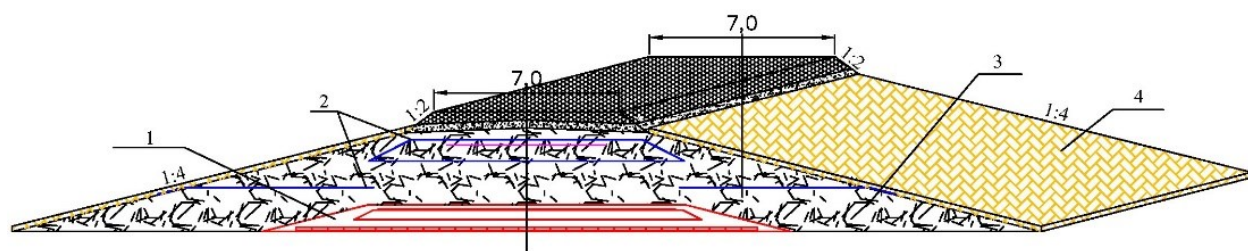


Рис. 1. Поперечный профиль земляного полотна участка железнодорожной линии Обская – Бованенково – Карская с использованием технологической автодороги (ТАД): 1 – ТАД; 2 – геотекстильная обойма с твердомерзлым грунтом; 3 – насыпь; 4 – торфяная песчаная смесь [9; 11]

При строительстве геотехнических объектов транспортной инфраструктуры, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, необходимо контролировать и координировать во времени физико-механические свойства грунтов, технологические процессы и основные организационные

решения с целью своевременной сдачи объектов в эксплуатацию [9; 11].

Принципиальная схема обеспечения надежности реализации объекта с минимизацией затрат на его возведение на всех стадиях его жизненного цикла в комплексной постановке приведена на рис. 2. Основными этапами реализации

являются: формирование и выбор конструктивно-технологических схем при проектировании производства работ, определение и мониторинг организационных характеристик, регулирование

технологических параметров с учетом конкретных организационно-технологических условий [9; 11].

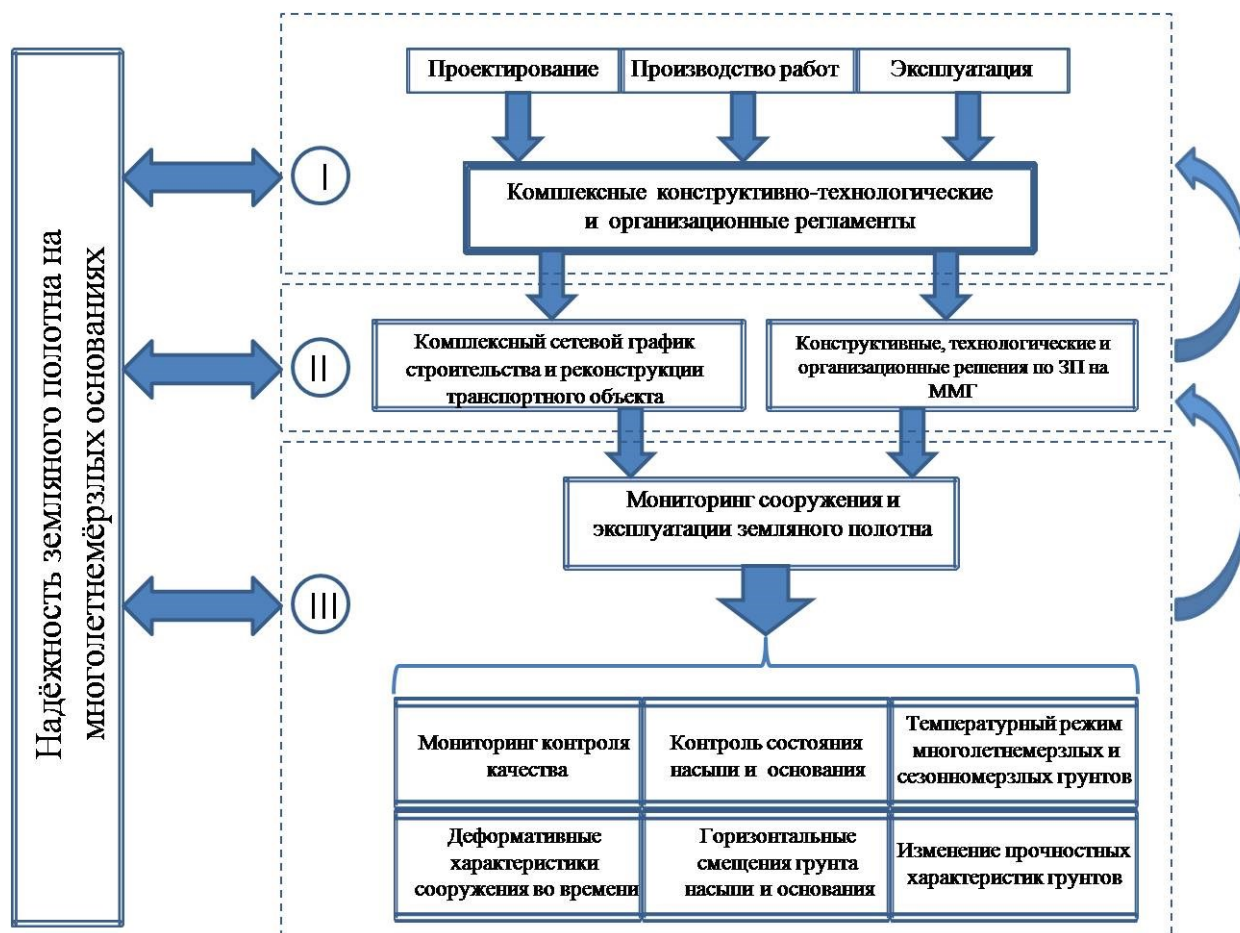


Рис. 2. Принципиальная схема взаимосвязи конструктивных, технологических и организационных параметров земляного полотна на многолетнемерзлых основаниях [9; 11]

В связи с непрерывно изменяющимися во времени внешними факторами (физико-механические свойства грунтов, природно-климатические условия, внешние нагрузки и др.) на всех стадиях жизненного цикла транспортного объекта (инженерные изыскания, архитектурно-строительное проектирование, строительство, эксплуатация и др.) конструктивные, технологические и организационные решения геотехнических сооружений на многолетнемерзлых основаниях должны быть взаимосвязаны, а их выбор рассмотрен как комплексная задача. Методика решения этой задачи с системотехнических позиций основана на постоянном мониторинге характери-

стик с целью определения их совместного влияния на результирующие показатели: срок сдачи этапа работ, открытие временной эксплуатации, темпы и стоимость работ. Таким образом, применяется следующий алгоритм [9; 11]:

1. На стадии архитектурно-строительного проектирования принимаются типовые конструктивно-технологические схемы.

2. Запроектированная конструкция и соответствующая ей технология определяют состав, объемы земляных работ и, как следствие, сроки их выполнения.

3. Сроки контролируются с позиций своевременной сдачи этапа работ каждого участка геотехнического сооружения.

4. В случае невозможности выполнения сроков рассматривается возможность и целесообразность принятия альтернативных вариантов конструктивно-технологических решений ускорения земляных работ.

Важным при строительстве объектов является условие завершения работ в контрактный срок. На участках строительства транспортных объектов, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, часто возникает необходимость в корректировке первоначально принятых конструкций в зависимости от времени года для их реализации, а также в координации технологических и организационных, в первую очередь, срокообразующих решений [9; 11].

Таким образом, в этой комплексной задаче в рамках системного подхода взаимосвязаны интересы конструкторов, технологов и организаторов производства (рис. 3). Решение и реализация та-

кой сложной многоэтапной задачи выработки взаимоувязанных организационных, конструктивных и технологических решений основано на организационно-технологических схемах (ОТС). Организационно-технологические схемы (ОТС) объединяют локальные технологические схемы производства отдельных видов работ, в т.ч. технологические решения по производству подготовительных, карьерных, транспортных работ, строительству земляных сооружений комплексной конструкции. Опыт разработки ОТС показал, что на сложных объектах особенно важно учитывать взаимосвязь параметров технологических функций, экологических требований и организационной структуры строительного производства и на их основе регулировать конструктивно-технологические решения (КТР). Методика выбора регулирующих параметров основана на структурном и функциональном анализе ОТС [9; 11].

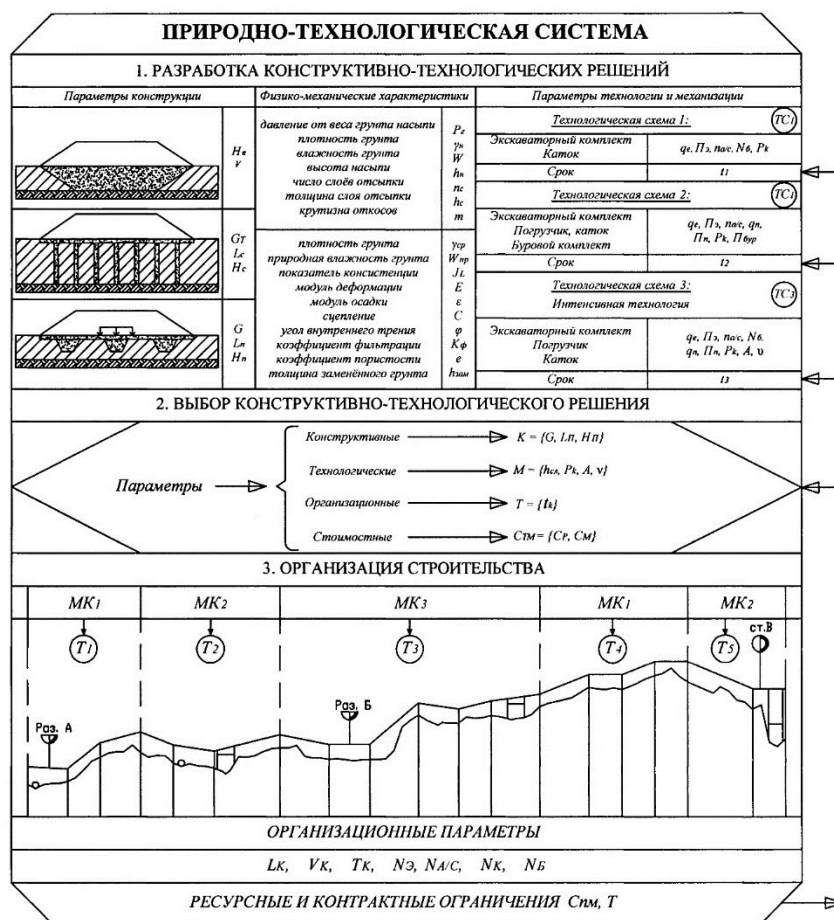


Рис. 3. Моделирование взаимосвязи конструктивных, технологических и организационных параметров [9; 11]

Технологический мониторинг. Обязательным при возведении геотехнических сооружений на мерзлоте является проведение технологического мониторинга, который может быть ограничен функциями измерения, передачи и накопления оперативной информации, но может включать и компоненту обработки информации для подготовки и принятия организационно-управленческих решений для корректировки возникающих отклонений. Под мониторингом понимается определенная процедура управления состоянием геотехнической системы «земляное полотно», осуществляемая по целевой программе и состоящая из наблюдений, измерения и оценки параметров процесса; прогноза развития состояния и разработки регулируемых технологических режимов её функционирования [9; 11; 12].

Под технологическим мониторингом в методике понимается контроль состава, последовательности и результатов выполнения технологических процессов во взаимосвязи с мониторингом состояния насыпи и основания. Он включает не только функции измерения, передачи и накопления оперативной информации, но и компоненту обработки информации для подготовки и принятия организационно-управленческих решений по корректировке возникающих отклонений конструктивно-технологических параметров. В свете этого в методике предлагается система регулирования технологических режимов, схема которой (пример реализации) представлена на рис. 4 [9; 11; 12].

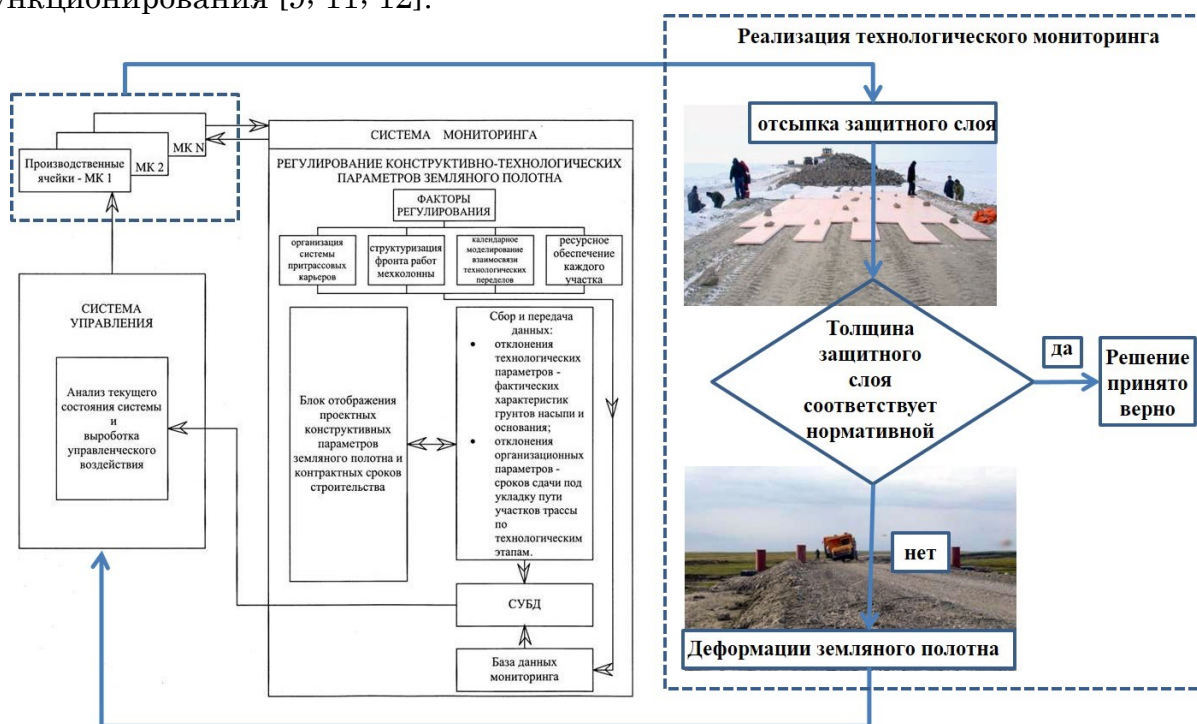


Рис. 4. Схема системы мониторинга (пример реализации) [9; 11]

Надежность геотехнических объектов в криолитозоне. При строительстве инфраструктурных объектов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, до конца не решенным остается вопрос с определением надежности в количественном выражении. Надежность всей геотехнической системы «Объект – Грунтовое основание»

определяется для каждой подсистемы отдельно. Для подсистемы «Объект» все необходимые предельные значения известны и даны в нормативных документах (сводах правил) для этих объектов (например, максимальная осадка и др.). Для подсистемы «Грунтовое основание» надежность зависит от многих факторов,

подходы к ее оценке представлены в монографии [10].

Анализ материалов по строительству инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования «Обская – Салехард – Надым» [4; 6–8] показал, что Концессионер и Концедент не проводили количественный анализ возможности возникновения рисков при реализации проекта, который реализуется на механизмах государственно-частного партнерства. В бизнес-плане представлена матрица распределения рисков (выполнен ООО «Первая инфраструктурная») по проекту. В ней представлены этапы реализации проекта; рассмотрены риски, возникающие на каждом этапе работ; определены стороны, которые несут риск; мероприятия по минимизации риска; действия Сторон при наступлении риска, предусмотренные в Концессионном соглашении. Следует иметь в виду, что в матрице распределения рисков не учтены риски, связанные с изменением климата в Арктической зоне. При отсутствии количественных оценок по перечисленным рискам невозможно оценить надежность проекта в целом и управлять ею.

Дополнительно к этому можно рассмотреть следующую последовательность восстановления работоспособного состояния железнодорожной линии в Арктической зоне с обеспечением гарантированного времени выполнения процесса в целом и его составляющих. Согласно ГОСТ 32192–2013, среднее время до восстановления железнодорожной техники определяется как математическое ожидание интервала времени от момента отказа железнодорожной техники до момента восстановления ее работоспособного состояния. Время ремонта, согласно ГОСТ 32192–2013, включает следующие виды задержек и временные интервалы (рис. 5):

- логистические;
- административные;
- технические:
 - время обнаружения и локализации неисправности;
 - время устранения неисправности;
 - время контроля функционирования.

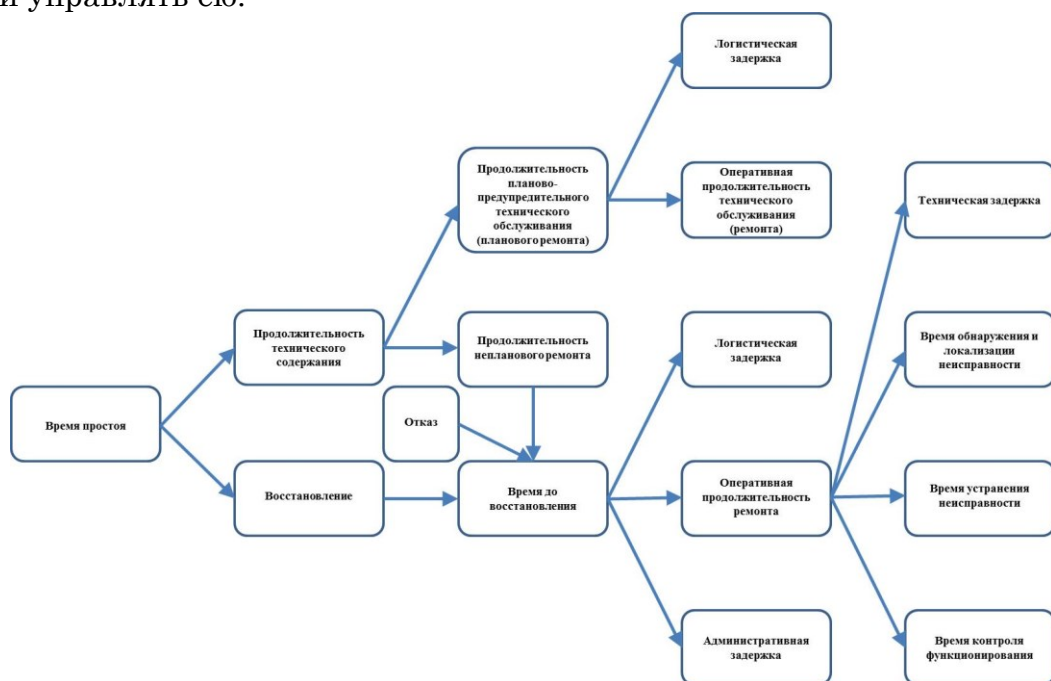


Рис. 5. Составляющие продолжительности технического содержания согласно ГОСТ 32192–2013

Из перечисленных операций уверенно спрогнозировать можно продолжительность только двух последних. Логистическая задержка может быть компенсирована за счет ввода в действие плана аварийно-восстановительных мероприятий, который разрабатывается заранее и обкатывается на учениях. Также предварительной подготовки требует процедура обнаружения и локализации неисправности.

Такой анализ позволит свести к минимуму технические и технологические

задержки, но компенсировать помехи, вызванные сложными природно-климатическими условиями, часто не удастся. Поэтому для обеспечения гарантированного времени восстановления работоспособности объекта необходима тщательная отработка организационно-технологического решения.

Согласно ГОСТ 32192–2013 была разработана схема состояний и событий для железнодорожного пути (рис. 6).

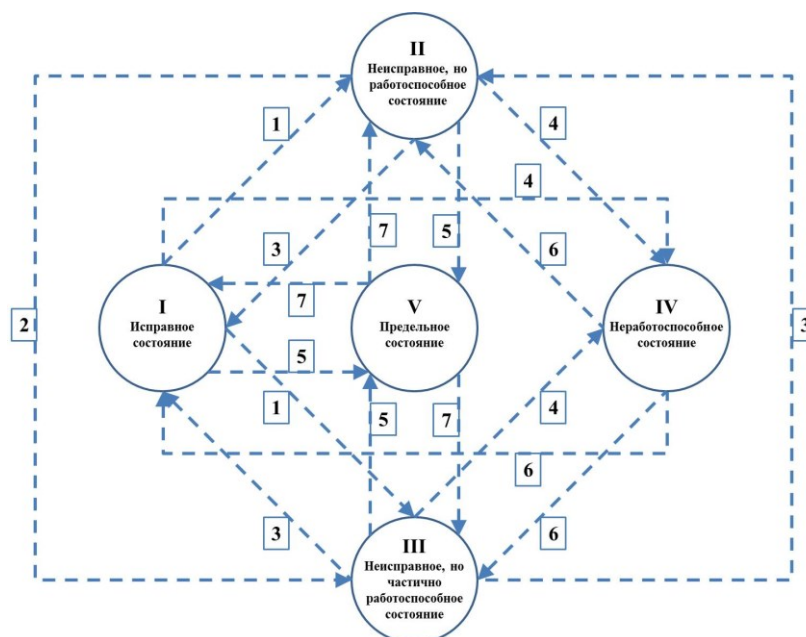


Рис. 6. Схема состояний и событий для железнодорожного пути согласно ГОСТ 32192–2013:

1 – накопление повреждений; 2 – частичный отказ железнодорожного пути; 3 – текущее содержание пути; 4 – полный отказ железнодорожного пути; 5 – переход железнодорожного пути в предельное состояние; 6 – восстановление работоспособного состояния железнодорожного пути; 7 – реконструкция (модернизация), капитальный ремонт железнодорожного пути

Вывод. Проведенный анализ действующих нормативных документов, а также проектов развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны показал, что в них не освещены вопросы, связанные с оценкой надежности конструктивных и организационно-технологических решений при проектировании оснований геотехнических сооружений на многолетнемерзлых грунтах, а также технологические требования к их строительству и реконструкции с учетом возможного изменения климата. Предложена принципиальная схема, а также методика, позволяющая управлять

надежностью конструктивных и организационно-технологических решений при проектировании оснований геотехнических сооружений на многолетнемерзлых грунтах за счет выполнения технологического мониторинга, а также технологические требования к их строительству и реконструкции с учетом возможного изменения климата. Предложена последовательность восстановления работоспособного состояния железнодорожной линии в Арктической зоне с обеспечением гарантированного времени выполнения процесса в целом и его составляющих.

Список источников

1. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 // КонсультантПлюс [Справочная правовая система]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/
2. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации»: Постановление Правительства РФ от 30.03.2021 №484 (ред. от 30.10.2021) // КонсультантПлюс [Справочная правовая система]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_381261/
3. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30 декабря 2009 года №384-ФЗ.
4. О заключении концессионного соглашения на финансирование, строительство и эксплуатацию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования «Обская – Салехард – Надым»: Распоряжение Правительства РФ от 08.08.2018 №1663-р (ред. от 21.03.2020) // КонсультантПлюс [Справочная правовая система]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?from=371440-0&rnd=24E24E4EEFB6995C594211FE566A3625&req=doc&base=EXP&n=740763&REFDOC=371440&REFBASE=EXP#s4jl0yg56s>
5. Специальные технические условия на проектирование и строительство объекта «Завершение строительства (усиление) железнодорожной линии «Надым – Пангоды». Санкт-Петербург: АО «Гипротранспроект»: РУТ (МИИТ), 2020. 21 с.
6. Концессионное соглашение на финансирование, строительство и эксплуатацию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования «Обская – Салехард – Надым», заключенного между Росжелдор и ООО «СПХ». М., 2018.
7. Бизнес-план проекта «Создание железнодорожного Северного широтного хода «Обская – Салехард – Надым – Пангоды – Новый Уренгой – Коротчаево» и железнодорожных подходов к нему». М.: ОАО «РЖД», 2017. 186 с.
8. Справочная информация об инвестиционном проекте «Создание железнодорожного Северного широтного хода «Обская – Салехард – Надым – Пангоды – Новый Уренгой – Коротчаево» и железнодорожных подходов к нему». М., 2017.
9. Строительство путей сообщения на Севере / Т.В. Шепитько, П.М. Токарев, А.Н. Дудников, А.М. Черкасов, С.Я. Луцкий [и др.]. М.: ЛАТМЭС, 2009. 284 с. – ISBN 9785932715291.
10. Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Геологический факультет. М.: Университетская книга, 2011. 259 с. ISBN 978-5-91304-228-6.
11. Черкасов А.М. Обоснование конструктивно-технологических решений по земляному полотну железных дорог на многолетнемерзлых основаниях: дисс. ... кандидата технических наук: 05.22.06 / Черкасов Александр Михайлович; [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. М., 2009. 153 с.
12. Луцкий С.Я., Шепитько Т.В., Черкасов А.М. Технологический мониторинг сооружения земляного полотна на высокотемпературной мерзлоте // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: материалы симпозиума, Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г. / под ред. А.Л. Исакова и Ц.К. Лю. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 41–48.
13. Минстрой России формирует стандарты строительства и эксплуатации объектов на многолетнемерзлых грунтах. // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) 29 декабря 2020. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/minstroy-rossii-formiruet-standarty-stroitelstva-i-ekspluatatsii-obektov-na-mnogoletnemerzlykh-grunt/>

References

1. On the Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035: Decree of the President of the Russian Federation No. 645 dated 10/26/2020 // ConsultantPlus [Reference Legal System]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/
2. On the approval of the state program of the Russian Federation «Social and economic development of the Arctic zone of the Russian Federation»: Decree of the Government of the Russian Federation of 30.03.2021 No. 484 (ed. of 30.10.2021) // Consultant-Plus [Reference legal system]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_381261/
3. Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures: Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009.
4. On the conclusion of a concession agreement for the financing, construction and operation of the infrastructure of the Ob-Salekhard- Nadym public road transport: Decree of the Government of the Russian Federation dated 08.08.2018 No. 1663-r (ed. dated 21.03.2020) // ConsultantPlus [Reference Legal System]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?from=371440-0&rnd=24E24E4EEFB6995C594211FE566A3625&req=doc&base=EXP&n=740763&REFDOC=371440&REFBASE=EXP#s4jl0yg56s>
5. Special technical conditions for the design and construction of the object "Completion of construction (strengthening) of the railway line «Nadym – Pan-years». Saint Petersburg: JSC «Giprotrans-project»: RUT (MIIT), 2020. 21 p.
6. Concession agreement for financing, construction and operation of the infrastructure of public railway transport «Ob-skaya – Salekhard – Nadym», concluded between Roszheldor and LLC «SSHH». Moscow, 2018.
7. Business plan of the project «Creation of the same-road Northern latitudinal highway «Ob – Salekhard – Nadym – Pangody – Novy Urengoy – Korotchaev» and the same-road approaches to it». Moscow: JSC «Russian Railways», 2017. 186 p.
8. Background information about the investment project «Creation of the railway Northern latitudinal course «Ob - Salekhard - Nadym – Pangody – Novy Urengoy – Korotchaev» and railway approaches to it». Moscow, 2017.
9. Construction of communication routes on North / T.V. Shepitko, P.M. Tokarev, A.N. Dudnikov, A.M. Cherkasov, S.Ya. Lutskiy [et al.]. Moscow: LATMES, 2009. 284 p. ISBN 9785932715291.
10. Khrustalev L.N., Parmuzin S.Yu., Emelyanova L.V. Reliability of northern infrastructure in a changing climate; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology. Moscow: University Book, 2011. 259 p. ISBN 978-5-91304-228-6.
11. Cherkasov A.M. Substantiation of structural and technological solutions for the earthwork of railways on permafrost bases: diss. ... candidate of Technical Sciences: 05.22.06 / Cherkasov Alexander Mikhailovich; [Place of protection: Moscow State University of Ways of Communication. (MIIT) MPS RF]. M., 2009. 153 p.
12. Lutsky S.Ya., Shepitko T.V., Cherkasov A.M. Technological monitoring of the construction of an earthen bed on high-temperature permafrost // The second International symposium of earthen floor in cold regions: materials of the symposium, Novosibirsk, September 24-26, 2015 / edited by A.L. Isakov and Ts.K. Liu. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Transport, 2015. pp. 41-48.
13. The Ministry of Construction of Russia forms standards for the construction and operation of facilities on permafrost soils. // Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Ministry of Construction of Russia) December 29, 2020. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/minstroy-rossii-formiruet-standarty-stroitelstva-i-ekspluatatsii-obektov-na-mnogoletne-merzlykh-grunt/>

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 44–50.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):44–50.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 551.34:624.139.6

doi: 10.52978/25421220_2022_12_44–50

**МЕТОДЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ**

**Александра Александровна Попова¹, Елена Александровна Еремеева²,
Юлия Владимировна Власова³, Татьяна Васильевна Никитина⁴**
^{1,2,3,4}Северные Изыскания, г. Москва, Россия.

Аннотация. Строительство и эксплуатация зданий и сооружений в сложных и динамично изменяющихся природных условиях Крайнего Севера сопряжена с опасностью выхода параметров геотехнических систем за пределы установленных критериев надежности (безопасности). Обеспечение технологической надежности, промышленной и экологической безопасности объектов диктует необходимость выполнения геотехнического мониторинга.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, геокриологические условия, геологические опасности, природно-техническая система.

Для цитирования: Методы геотехнического мониторинга при изменении геокриологических условий территории / А.А. Попова, Е.А. Еремеева, Ю.В. Власова, Т.В. Никитина // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 44–50. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_44–50.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**METHODS OF GEOTECHNICAL MONITORING WHEN CHANGING
GEOCRIOLOGICAL CONDITIONS OF THE AREA**

Alexandra A. Popova¹, Elena A. Eremeeva², Yulia V. Vlasova³, Tatiana V. Nikitina⁴
^{1,2,3,4}Northern Survey, Moscow, Russia.

Abstract. The construction and operation of buildings and construction in the complex and dynamically changing natural conditions of the Far North is associated with the danger of the parameters of geotechnical systems going beyond the established reliability (safety) criteria. Ensuring technological reliability, industrial and environmental safety of buildings dictates the need for geotechnical monitoring.

Keywords: geotechnical monitoring, geocryological conditions, geological hazards.

For citation: Methods of geotechnical monitoring when changing geocryological conditions of the territory / A.A. Popova, E.A. Ereemeeva, Yu.V. Vlasova, T.V. Nikitina. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):44–50. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_44-50.

Опыт строительства и эксплуатации инженерных объектов в зоне распространения многолетнемерзлых пород свидетельствует, что значительная часть аварийных ситуаций обусловлена возведением сооружений без учета всей сложности геокриологических условий. К числу наиболее распространённых опасностей, возникающих в результате активной хозяйственной деятельности человека, следует отнести снижение несущей способности грунтов, пучение, осадку поверхности, наледеобразование, гравитационные смещения грунта.

Изменения геокриологических условий происходят в результате реакции верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на сложившиеся условия теплообмена на поверхности вследствие техногенного воздействия, а также усугубляются развивающимся потеплением климата. В докладе Росгидромета отмечается, что потепление продолжается на всей территории России в целом за год и во все сезоны. Скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры за период 1976–2021 гг. составила 0,49 °C / 10 лет (вклад в общую изменчивость 54%). Более чем на 70% площадок значения мощности сезонно-талого слоя в 2021 г. превышают средние многолетние величины, при этом сохраняется значительная изменчивость по регионам. Тренды практически на всех площадках сохраняют положительные значения, что свидетельствует об устойчивой тенденции увеличения глубины оттаивания вечной мерзлоты в XXI в. [2].

С начала 90-х гг. прошлого столетия практически во всех городах Севера отмечается опасное состояние зданий. Здания деформированы и находятся в аварийном состоянии в Якутске – 61%, в Воркуте – 80%, в Чите – 70%, в

Магадане – 55%, в Норильске – 42%, в Бурятии – 70% [4].

С целью обеспечения технологической надежности, промышленной и экологической безопасности необходимо создавать систему комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием техносферы – систему геотехнического мониторинга (ГТМ).

Система ГТМ включает в себя:

- организационную структуру;
- нормативную и правовую базу;
- объекты контроля;
- сеть режимных наблюдений (сеть ГТМ);
- методики и аппаратные средства сбора, обработки, анализа, передачи и хранения данных;
- методики расчета, моделирования и прогнозирования;
- методики и средства управления состоянием природно-технических систем.

Реализация системы геотехнического мониторинга осуществляется проведением комплекса полевых и камеральных работ. Они представлены четырьмя основными направлениями – сбор информации, обработка результатов, геотехнический прогноз и принятие управляющих решений (табл. 1).

Таблица 1

Схема реализации геотехнического мониторинга

Геотехнический мониторинг			
Полевые работы	Камеральные работы		
Сбор информации	Обработка полученных данных	Геотехнический прогноз	Принятие управляющих решений

Состав, объем, и режим выполнения работ в рамках ГТМ должны обеспечивать полноту информации, позволяющую постоянно осуществлять комплекс-

ную диагностику геотехнической системы, своевременно выявлять отклонения от проектов, строительных норм и правил, которые могут повлечь снижение эксплуатационной надежности эксплуатируемых объектов, аварийные ситуации или нанести ущерб окружающей среде.

Дополнительным источником информации о состоянии геотехнической системы могут являться сведения, полученные от эксплуатирующей организации, в том числе любые нарушения стабильности фундаментов, перекосы, вибрация оборудования, трещины в кладке, продольные и вертикальные деформации линейной части, условия снеготаносимости и т.д. (рис. 1).



Рис. 1. Снежные завалы около аварийного здания с вентилируемым подпольем, Норильск, р-он Талнах

Выделяются два временных этапа планового получения информации о состоянии контролируемой геотехнической системы в соответствии с различными стадиями жизненного цикла инженерных объектов: начальный этап эксплуатации и этап интенсивной эксплуатации инженерных объектов.

В начальный период эксплуатации (около 3 лет) взаимодействие сооружений с природной средой происходит наиболее активно, возможны существен-

ные изменения геокриологической обстановки и деформации сооружений. В этот период должна быть оценена эффективность используемых способов инженерной подготовки территории, стабилизации температурного режима грунтов оснований, природоохранных и других мероприятий.

Завершение начального этапа характеризуется относительным динамическим равновесием в системе «инженерное сооружение – природная среда», фиксируется снижение или отсутствие последствий строительного периода.

На некоторых инженерных объектах по прошествии первых трех лет эксплуатации периодичность наблюдений в рамках ГТМ может быть снижена. Это возможно в том случае, если в конце начального этапа эксплуатации на этих объектах отмечается отсутствие отклонений от установленных проектом параметров и происходит стабилизация температурного режима грунтов оснований. Дифференцированный подход к проведению режимных наблюдений может значительно снизить затраты на выполнение геотехнического мониторинга в целом.

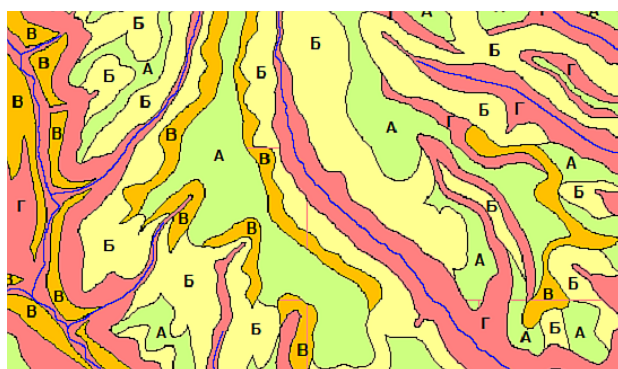
Основой для определения периодичности наблюдений являются геотехнические параметры строительных объектов – уровень ответственности сооружений и уровень сложности условий освоения (табл. 2).

Таблица 2
Периодичность наблюдений в рамках ГТМ в зависимости от геотехнических параметров строительных объектов

Геотехнические параметры объектов		Уровень ответственности сооружений	
		повышенный	нормальный
Уровень сложности строительного освоения	очень сложный	I	I
	сложный	I	II
	умеренно сложный и относительно простой	II	III

I – высокая периодичность наблюдений, II – повышенная периодичность наблюдений, III – нормальная периодичность наблюдений.

Определение сложности условий освоения проводится на основе материалов, полученных на всех этапах инженерно-геологических изысканий. В качестве базового инструмента используется карта районирования по условиям строительного освоения, а также геологические разрезы и геологические колонки. На основе анализа материалов сложные инженерно-геологические условия территории можно разделить на категории: относительно простые, умеренно сложные, сложные и очень сложные (рис. 2).



Степень сложности условий освоения	
Относительно простые – А	
Умеренно сложные – Б	
Средней сложности – В	
Сложные – Г	

Рис. 2. Фрагмент карты районирования по условиям строительного освоения

Факторы, определяющие сложность природных условий освоения территории:

- рельеф;
- льдистость многолетнемерзлых пород в разрезе (в том числе наличие ПЖЛ и пластовых льдов);
- засоленность мерзлых грунтов и присутствие линз криопэггов;
- экзогенные геологические процессы (площадь распространения);
- динамика развития экзогенных геологических процессов в естественных условиях, при строительстве и в период эксплуатации инженерных объектов;
- затопляемость паводковыми и морскими водами.

Развитие опасных геокриологических процессов и деформаций сооружений в период интенсивной эксплуатации могут произойти либо из-за нарушений условий эксплуатации, либо в результате значительных изменений природных условий (например, глобального потепления климата).

Для участков с умеренно сложными условиями возникновения опасных процессов возможно, но может быть остановлено применением стандартного комплекса инженерных мероприятий. Сложные условия освоения требуют применения широкого комплекса мероприятий инженерной защиты, специфических для каждого процесса, в особых случаях – нестандартных управляющих решений. В очень сложных условиях освоения для сохранения устойчивости геологической среды и предотвращения развития опасных процессов следует применять специальные проектные решения и сложный комплекс мероприятий инженерной защиты. Таким образом, от уровня ответственности сооружений и категории сложности условий освоения зависят требования к периодичности проведения работ ГТМ.

Основой системы мониторинга является сеть ГТМ, созданная на стадии проектирования и строительства инженерных объектов.

Сеть ГТМ включает в себя следующие элементы:

- створы контроля состояния снежного покрова;
- контрольные гидрологические створы;
- глубинные геодезические реперы;
- деформационные марки;
- термометрические наблюдательные скважины;
- гидрогеологические наблюдательные скважины;
- опытные полигоны и участки фонового мониторинга.

Контролируемые параметры при геотехническом мониторинге в районах распространения многолетнемерзлых

пород регламентируются Сводами правил [7–9]:

- вертикальные и горизонтальные перемещения;
- температура пород (рис. 3);
- температура сезонно-охлаждающих устройств;
- уровень подземных вод;
- мощность и плотность снежного покрова;
- динамика развития опасных экзогенных геологических процессов.



Рис. 3. Измерение температуры в скважине в ручном режиме

Виды работ, осуществляемые в рамках выполнения геотехнического мониторинга, и их периодичность должны обеспечивать получение необходимого набора параметров, позволяющих:

- достоверно определить текущее изменение геокриологических условий;
- определить техническое состояние зданий и сооружений;
- спрогнозировать возможное изменение ситуации в течение ближайших лет с целью выработки необходимых мероприятий по ее стабилизации.

Геодезические наблюдения (нивелирование грунтовых реперов и деформационных марок) в составе геотехнического мониторинга применяют для измерения вертикальных и горизонтальных перемещений искусственных сооружений и поверхности земли. Геодезическими методами определяются как местные, так и общие деформации зданий,

осадки фундаментов и грунтов, по которым конкретно судят о техническом состоянии зданий и сооружений.

Тепловизионное обследование выполняется для оценки работы сезонно-охлаждающих устройств, которые работают за счет естественной разности температур грунта и низких температур окружающего воздуха в холодный период года.

Термометрические наблюдения в скважинах проводятся с целью определения динамики температурного режима грунтов и геокриологических процессов. Температурные наблюдения в скважинах [1] должны сопровождаться замерами температуры воздуха и глубины сезонноталого слоя или высоты снежного покрова (в зависимости от сезона).

Гидрогеологические наблюдения в скважинах проводятся с целью изучения динамики уровня подземных вод в грунтах оснований и исследования химического состава воды. Гидрогеологические методы в составе геотехнического мониторинга включают в себя комплекс работ в специально обустроенных гидрогеологических скважинах по определению изменений уровней подземных вод или величин пьезометрических напоров в водоносных горизонтах на площадке размещения объектов и на прилегающей территории, а также изучение химического состава подземных вод.

Снегомерная съемка выполняется для оценки теплообмена на поверхности грунтов в холодный период года [3]. Определение основных характеристик снежного покрова на элементах ландшафта производят на выбранных и закрепленных створах или точках наблюдения, в том числе вблизи сооружений.

Гидрологические наблюдения проводятся с целью определения наличия или опасности подтопления и размывов оснований промышленных площадок и инженерных объектов.

Маршрутные исследования выполняются для визуального контроля за компонентами природно-технической обстановки с целью своевременного выявления опасных процессов [3]. Во время маршрутов определяется состояние геологической среды, проводятся ландшафтно-индикационные исследования, в процессе которых выявляются антропогенные индикаторы и нарушенные индикационные связи между различными компонентами ландшафта под воздействием хозяйственного освоения территории. Также обследуются ключевые участки интенсивного воздействия техногенных объектов на геологическую среду. Фиксируются площади распространения инженерно-геологических процессов, и на этих участках измеряются глубины сезонного оттаивания. Также глубины сезонного оттаивания измеряются на участках потенциального развития инженерно-геологических (геокриологических) процессов: у подножия насыпей, в местах стока вод из лотков и труб водоотведения, на участках снежных отвалов и пр.

Фоновый мониторинг выполняется для контроля изменений природной среды, не подверженной техногенному воздействию (рис. 4).



Рис. 4. Термометрическая скважина на площадке фонового мониторинга, Чукотка

Долговременные систематические наблюдения в рамках программы фонового мониторинга осуществляются на

специально выделенных площадках с целью выявления изменений природных условий в результате климатических колебаний (например, глобального потепления).

Дополнительные исследования при отклонении контролируемых показателей. При отклонениях от проектной документации в период строительства или эксплуатации сооружений проводится количественный прогноз – теплотехнические и геотехнические расчеты с учетом выявленных тенденций и отклонений контролируемых параметров [5; 8].

Для получения достоверных показателей, используемых в прогнозных расчетах, необходимо проведение обследований фундаментов сооружений и выполнение дополнительных инженерно-геологических изысканий. Необходимо получить откорректированные на момент выявленных отклонений показатели водно-физических, физико-механических и теплофизических свойств грунтов основания сооружений [6].

При обнаружении в ходе выполнения ГТМ активизации опасных экзогенных геологических процессов или их новых проявлений необходимо провести качественный, а в некоторых случаях количественный прогноз развития процессов (термокарста, пучения, термоэрозии, морозобойного растрескивания). Прогноз устойчивости склонов и сооружений необходимо осуществлять на основании выполнения прогнозных теплотехнических расчетов, схематизации природных условий и определения поверхностей скольжения в мерзлых породах, а также возможности возникновения и развития солифлюкции.

Прогнозные расчеты должны установить максимальные сроки принятия технических управляющих решений для компенсирующих мероприятий. Выбор одного или сочетания нескольких мероприятий должен производиться на основании расчетов: прогнозного теплотех-

нического, устойчивости и несущей способности с учетом конструктивных и технологических особенностей сооружения, опыта местного строительства и экономической целесообразности.

Заключение. Комплекс полномасштабных работ по ГТМ, обеспеченных базовыми сведениями фонового монито-

ринга, – это основной источник информации об изменении геокриологических условий. Следовательно, состав, объем и режим выполнения работ в рамках геотехнического мониторинга должны быть достаточными и необходимыми для диагностики и обеспечения работоспособности геотехнической системы.

Список источников

1. ГОСТ 25358–2020 Грунты. Метод полевого определения температуры.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Росгидромет, 2022.
3. Методика мерзлотной съемки. М.: Изд-во МГУ, 1979.
4. Минкин М.А. Основания и фундаменты сооружений на вечномёрзлых грунтах. М.: ГАСИС, 2005.
5. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геокриологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1974.

6. Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномёрзлых грунтах. М.: НИИОСП, 1982.
7. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83.
8. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88.
9. СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве.

References

1. GOST 25358-2020 Soils. The method of field determination of temperature.
2. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2021. Roshydromet, 2022.
3. Methods of permafrost survey. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1979.
4. Minkin M.A. Foundations and foundations of structures on permafrost soils. Moscow: GASIS, 2005.
5. Fundamentals of permafrost forecasting in engineering geocryological studies. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1974.

6. Recommendations for monitoring the condition of the soils of the foundations and foundations of buildings and structures erected on permafrost soils. Moscow: NIIOSP, 1982.
7. SP 22.13330.2016 Foundations of buildings and structures. Updated revision of SNiP 2.02.01–83.8.
8. SP 25.13330.2020 Foundations foundations on permafrost soils. The authorized version of SNiP 2.02.04–88.
9. SP 305.1325800.2017 Buildings and structures. Rules for conducting geotechnical monitoring during construction.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 51–56.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):51–56.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 691.32

doi: 10.52978/25421220_2022_12_51–56

СБОРНЫЕ ДОРОЖНЫЕ ПЛИТЫ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ЗОН

Валерий Иванович Трофимов¹, Андрей Романович Егоров²,
Григорий Алексеевич Хитрич³

^{1,2,3}Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия.

Аннотация. В представленной статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности работы дорожных цементобетонных покрытий в Арктической зоне. Предлагается для изготовления дорожных плит с повышенной эксплуатационной надежностью использовать технологию многослойных плит с применением композитных материалов и изделий на полимерной основе. Обосновывается исполнение дорожной плиты сборной – двухслойной или трехслойной, где нижний и верхний слои выполняются из готовой полимерной композитной плиты. Получены положительные результаты комплексных испытаний на моделях.

Ключевые слова: Арктическая зона, трещиностойкость, полимерная композитная плита, арматура, сборная дорожная плита.

Для цитирования: Трофимов В.И., Егоров А.Р., Хитрич Г.А. Сборные дорожные плиты для Арктических зон // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 51–56. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_51–56.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

PREFACE ROAD PLATES FOR ARCTIC ZONES

Valery I. Trofimov¹, Andrey R. Egorov², Grigory A. Khitrich³

^{1,2,3}Tver State Technical University, Tver, Russia.

Abstract. The article deals with the actual problem of improving the efficiency of road cement concrete pavements in the Arctic zone. It is proposed to use the technology of multilayer slabs using composite materials and polymer-based products for the manufacture of road slabs with increased operational reliability. The execution of a prefabricated road plate is justified – two-layer or three-layer, where the lower and upper layers are made of a finished polymer composite plate. Positive results of complex tests on models have been obtained.

Keywords: Arctic zones, crack resistance, polymer composite plate, reinforcement, prefabricated road plate.

For citation: Trofimov V.I., Egorov A.R., Khitrich G.A. Prefabricated road slabs for Arctic zones. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):51–56. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_51–56.

Одним из важнейших условий эффективного обустройства северных территорий является ускоренное строительство широкой сети дорог и аэродромов. Однако суровые природно-климатические условия, повсеместное распространение структурно-неустойчивых при оттаивании мерзлых грунтов сдерживают широкомасштабное освоение арктических территорий. При этом эффективное освоение уникальных и стратегически важных для нашей страны месторождений, а также надежная их защита невозможны без применения новых технологических и конструктивных решений при сооружении транспортных объектов в удаленных районах Арктики [1].

В настоящее время доказано, что переход на технологию цементобетонных жестких покрытий дорог из сборного железобетона не только решает проблему радикального повышения грузоподъемности и долговечности автотрасс, но и позволяет значительно сократить время строительства автомобильных дорог.

Известно, что большая часть дорожного покрытия, особенно на Севере, выполняется из преднапряженных железобетонных плит. Однако суровые климатические условия, повышенные нагрузки, в том числе динамические, а также повсеместное распространение структурно неустойчивых пылеватых грунтов, на которые приходится укладывать дорожные плиты, приводит к их преждевременному разрушению.

Учитывая действие все возрастающих нагрузок на дорожное полотно, в настоящее время разрабатываются различные методы и технологические приемы с целью повышения несущей способности железобетонных дорожных плит. В то же время в последнее время в дорожном строительстве все шире начинают применять мобильные композитные плиты на полимерной основе, например, стеклопластиковые типа МДП «МОБИСТЕК». Из таких мобиль-

ных плит легко монтировать быстро-возводимые временные дорожные покрытия.

Повышенная прочность и гибкость композитных стеклопластиковых плит позволяет их устанавливать при минимальной подготовке поверхности грунтового основания. Кроме этого, повышенная сопротивляемость внешней среде обеспечивает возможность применения в любых климатических условиях.

Отмеченные положительные свойства у мобильных композитных дорожных плит: высокая их несущая способность, коррозионная стойкость и хорошая деформативность – позволили предложить новую конструкцию дорожной бетонной плиты. Такая плита изготавливается сборной (комбинированной), состоящей из двух или трех слоев: верхнего и нижнего слоя из готовой полимеркомпозитной плиты, а среднего – из бетонного слоя. Предложенная конструкция дорожной комбинированной плиты позволяет снизить ее массу и повысить несущую способность, что дает возможность отказаться в будущем от использования преднапряженных дорожных плит.

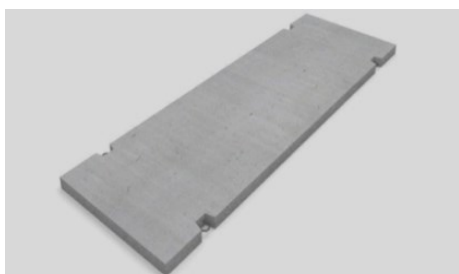
Важными вопросами изготовления многослойных плит являются вопросы технологичности и надежности соединения слоев. Например, в работе [2] обобщается применение в строительстве двухслойной дорожной плиты, где имеется верхний полимеркомпозитный слой, который предлагается отдельно формовать в виде плиты с укладкой специальных анкеров для соединения с бетонным слоем. Такая технология существенно повышает трудоемкость изготовления дорожной двухслойной сборной плиты, что резко снижает эффективность ее использования.

Авторами разработана более простая технология изготовления дорожных сборных плит. Для этого предлагается, во-первых, использовать готовую полимеркомпозитную плиту в качестве за-

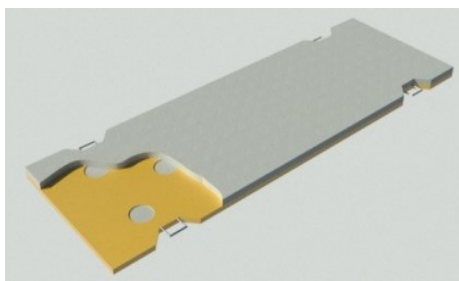
щитного слоя бетона, а во-вторых, использовать оригинальные более простые, более технологичные способы соединения полимеркомпозитных слоев с бетонным слоем [3; 4].

Соединение бетонного слоя с полимеркомпозитной плитой предлагается осуществлять простыми оригинальными способами, например, через анкера-бобышки, которые образуются при заполнении бетонной смесью отверстий, заранее засверленных в готовой полимеркомпозитной плите (рис. 1) [3]. Для более надежного соединения слоев, а также упрощения технологии сборной плиты могут быть использованы анкера в виде саморезов [4].

а)



б)



в)

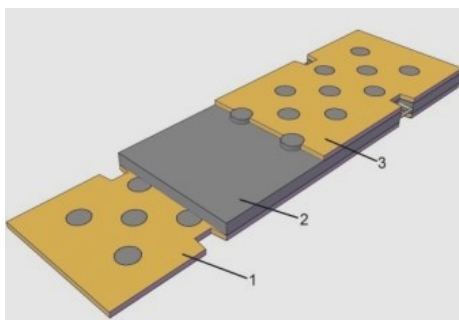


Рис. 1. Дорожные плиты: а – однослойная стандартная железобетонная плита; б – комбинированная сборная двухслойная плита; в – комбинированная сборная трехслойная плита: 1 – нижняя полимеркомпозитная плита; 2 – бетонный армированный слой; 3 – верхняя полимеркомпозитная плита

По результатам испытаний модельных образцов-балочек были предложены и запатентованы новые конструкции сборной дорожной плиты с улучшенными эксплуатационными свойствами (см. рис. 1). В частности, разработана двухслойная плита с нижним слоем из полимеркомпозитной плиты [3] (см. рис. 1, б) и трехслойная плита с верхним и нижним слоем из полимеркомпозитной плиты [4] (см. рис. 1, в).

Трехслойную плиту рекомендуется использовать для наиболее сложных участков эксплуатации дорог и наиболее нагруженных, в частности, при строительстве дорог на Севере.

Для обоснования работоспособности предложенных новых технических решений были выполнены модельные испытания на двухслойных образцах-балочках с нижним слоем из стеклопластиковой пластины толщиной 3 мм (рис. 2). Для соединения стеклопластиковой пластины с бетонной матрицей в ней засверливались отверстия, чтобы в процессе формирования они заполнялись смесью и образовывались бетонные анкера – бобышки.

Ранее были выполнены испытания двухслойных балочек с нижним слоем из стеклопластика, которые доказали их работоспособность [5].

С целью оценки прочности соединения слоев и в целом работоспособности двухслойной балочки были продолжены исследования с целью оценки влияния площади анкеровки на ее несущую способность. Для этого были изготовлены стеклопластиковые пластины с различным диаметром отверстий.

Были подготовлены образцы комбинированных – двухслойных балочек 40×40×160 мм из цементно-песчаного раствора с соотношением 1 : 3 и с В/Ц = 0,5. Результаты испытаний представлены в таблице.

Результаты испытаний показали, что максимальное значение прочности двухслойной сборной балочки соответствует площади одной анкеровки 2,55 см².

Результаты испытаний образцов-балочек на изгиб

Масса образца, кг	Плотность, кг/м ³	Диаметр отверстий пластин, мм	Площадь анкеровки, см ²	Разрушающая нагрузка, МПа	Время деформирования, с
0,55	2110	0	0	4,08	27
0,52	2040	6	2,55	5,71	43
0,52	2030	8	5,02	4,80	32
0,52	2040	10	7,85	4,87	33

Меньшие значения прочности при меньших значениях площади анкеровки говорят о недостаточной степени соединения слоев, а при больших значениях площади анкеровки – об ослаблении структуры полимеркомпозитного слоя. При этом, согласно таблице, начало процесса трещинообразования за счет лучших деформационных свойств композитной пластины значительно отодвигается, что позволяет говорить о значительном удлинении срока службы дорожного покрытия в случае применения сборных полимеркомпозитных плит.

а)



б)



Рис. 2. Однослойная и двухслойная сборная балочки после испытания: а – вид однослойной балочки с образованной поперечной трещиной; б – вид полимеркомпозитной пластины без трещины сборной балочки

Осмотр двухслойной сборной балочки после испытания на изгиб показал, что разрушение произошло только по бетонному слою, что соответствует разнице в деформационных показателях композита и бетона, показанных выше. При этом соединение стеклопластиковой пластины с бетонным слоем не было нарушено. Полученные положительные результаты испытаний показали, что применение двухслойных сборных дорожных плит может быть более эффективно, чем использование стандартных однослойных железобетонных дорожных плит.

Для надежной работы двухслойной сборной плиты необходимо оценить несущую способность анкеров-бобышек. Расчет анкеров на несущую способность осуществляется из условия, что плита при приложении нагрузки будет работать на изгиб. При этом наиболее слабым (опасным) местом будет являться соединение нижнего слоя с бетонным слоем. В этом случае бетонные анкеры-бобышки, работая на отрыв, будут воспринимать в основном растягивающие напряжения σ_p .

Тогда условием безопасной работы двухслойной дорожной плиты будет:

$$\sigma_p > P/S = (m + F) / \pi r^2 n,$$

где P – максимальная нагрузка; m – масса плиты; F – максимальное рабочее усилие, действующее на плиту; S – площадь сечения всех анкеров-бобышек; r – радиус анкера-бобышки; n – количество анкеров-бобышек; σ_p – напряжение растяжения бетона.

Используя это условие, можно найти оптимальные размеры анкеров-бобышек (значение r) и их количество (n) при заданном значении P , которое назначается с учетом класса по прочности тяжелого бетона.

Выполненные испытания модельных образцов доказали работоспособность предложенного нового технического решения дорожной плиты. Поэтому можно выделить следующие преимущества

предложенных дорожных сборных (комбинированных) двухслойных и трехслойных дорожных плит перед стандартными дорожными железобетонными плитами:

- более высокие прочностные показатели при изгибе;
- повышенная трещиностойкость;
- повышенная стойкость к динамическим нагрузкам;
- повышенная коррозионная стойкость;
- меньшая масса плиты;
- возможность отказа от использования стальной арматуры;
- возможность обеспечения требуемых свойств для верхнего и нижнего слоев дорожной плиты согласно условиям ее работы.

Более высокие показатели по прочности, трещиностойкости и по сопротивляемости динамическим нагрузкам объясняется тем, что у полимеркомпозитного материала деформационные свойства лучше, чем у бетона. Появление трещин в бетоне не является только следствием коррозии. При испытании материала на растяжение деформация в предельном состоянии для стеклопластика составляет до 2,8%, а металла – 25%. При этом в СП52–101–2003 указано, что армиро-

ванные бетонные конструкции дают трещины уже при деформации растяжения 0,015%, т.е. задолго до достижения предела прочности арматуры, независимо от ее материала (композита или стали) [6].

Комбинированные двухслойные и трехслойные дорожные плиты повышенной трещиностойкости могут найти широкое применение при строительстве дорог в сложных природно-климатических условиях Арктических зон, особенно на тяжелонагруженных участках дорог с интенсивным движением при обустройстве нефтегазовых месторождений, а также при организации строительных площадок и выполнении ремонтных работ.

В заключение можно сказать, что выполненные предварительные модельные испытания новой конструкции сборной (комбинированной) дорожной плиты, в частности двухслойной, позволяют сделать вывод, что ее исполнение с нижним слоем из готовой полимеркомпозитной плиты, а также применение композитной арматуры позволит в будущем полностью отказаться от стальной арматуры, что улучшит физико-механические свойства дорожной бетонной плиты, значительно снизит ее массу и стоимость изготовления.

Список источников

1. Трофимов В.И. Повышение эффективности транспортного строительства в Арктических зонах // Научный вестник Арктики. 2018. №3. С. 31–39.
2. Патент РФ № 2667396. МПК E01C 5/22. Способ устройства дорожного покрытия повышенной долговечности / Б.Н. Сушенцев; заявитель и патентообладатель Сушенцев Б.Н. №2017140747; заявлено 22.11.2017; опубликовано 19.09.2018.
3. Патент РФ на полезную модель №201315, МПК E01C 5/06. Дорожная плита / В.И. Трофимов, А.Р. Егоров, К.А. Васючков; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет. №2020124222; заявлено 14.07.20; опубликовано 09.12.2020.
4. Патент РФ №2739818. МПК E01C 5/08. Дорожная плита / В.И. Трофимов; заявитель и патентообладатель Тверской государственный технический университет. № 202012163003(037106); заявлено 25.06.2020; опубликовано 28.12.2020.
5. Трофимов В.И., Джабаров А.С., Лёушкин В.Ю. Комбинированная дорожная плита для строительства на мерзлых грунтах // Сборник материалов XX межд. научно-техн. конф.: Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры. Тула: ТулГУ, 2019. С. 294–296.
6. [Электронный ресурс]. URL: <https://izh-reduktor.ru/about/art/article/mifyo-kompozitnoj-armature.html>.

References

1. Trofimov V.I. Increasing the efficiency of transport construction in the Arctic zones. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2018;(3):31–39.
2. RF Patent No. 2667396. IPC E01C 5/22. The method of the device of the road surface of increased durability / Sushentsev B.N.; applicant and patent holder Sushentsev B.N. No. 2017140747; declared on 11/22/2017; published on 09/19/2018.
3. RF Patent for utility model No. 201315, IPC E01C 5/06. Road plate / Trofimov V.I., Egorov A.R., Vasyuchkov K.A.; applicant and patent holder of Tver State Technical University. No. 2020124222; announced 14.07.20; published 09.12.2020.
4. RF Patent No. 2739818. IPC E01C 5/08. Road plate / Trofimov V.I.; founder and patent holder of Tver State Technical University. No. 202012163003(037106); announced 25.06.2020; published 28.12.2020.
5. Trofimov V.I. Dzhabarov A.S., Leshkin V.Yu. Combined road plate for construction on frozen soils // Collection of materials XX international scientific and Technical. conf.: Actual problems of construction, construction industry and architecture. Tula: TulSU, 2019. pp. 294–296.
6. [Electronic resource]. URL: <https://izh-reduktor.ru/about/art/article/mify-o-kompozitnoj-armature.html>.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 57–63.

Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):57–63.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 624.139

doi:10.52978/25421220_2022_12_57–63

**СЕВЕР – НАЧАЛО УСПЕШНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
НА МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЕ**

**Наталья Анатольевна Губина¹, Татьяна Игоревна Вакуленко²,
Римма Камыловна Рагимова³**

^{1,2,3}Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского,
г. Норильск, Россия

Аннотация. В статье изложены проблемы строительства на многолетней мерзлоте, затронута актуальная тема ремонта нулевых циклов и восстановления несущей способности зданий. Рассматриваются проблемы реновации, программы которой разрабатываются для каждого региона России, и для Крайнего Севера в частности. Особое внимание при этом уделяется грунту и способам его сохранения, т.е. вопросу сохранения «вечной мерзлоты». Проанализированы работы ученого, инженера М.В. Кима по свайному фундаменту, посвященные сохранению вечной мерзлоты, а также практический опыт канадских строителей.

Ключевые слова: фундамент, сваи, строительство, грунт, многолетняя мерзлота, Крайний Север, реновация.

Для цитирования: Губина Н.А., Вакуленко Т.И., Рагимова Р.К. Север – начало успешного строительства на многолетней мерзлоте // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 57–63. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_57–63.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**NORTH – THE BEGINNING OF SUCCESSFUL
CONSTRUCTION ON PERMAFROST**

Natalya A. Gubina¹, Tatyana I. Vakulenko², Rimma K. Ragimova³

^{1,2,3} Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia.

Abstract. The article outlines the problems of construction on permafrost, touches upon the topical issue of repairing zero cycles and restoring the bearing capacity of buildings. The problems of renovation are considered, the programs of which are developed for each region of Russia, and for the Far North in particular. Particular attention is paid to the soil and methods of its conservation, i.e. the issue of permafrost conservation. The works of the scientist, engineer M.V. Kim on pile foundations, dedicated to the preservation of permafrost, as well as the practical experience of Canadian builders.

Keywords: foundation, piles, construction, soil, permafrost, Far North.

For citation: Gubina N.A., Vakulenko T.I., Ragimova R.K. North – the beginning of successful construction on permafrost. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):57–63. (In Russ.). [http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_57–63](http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_57-63).

Чрезвычайная зыбкость при оттаивании, которая чаще всего приводит к перекосам зданий и сооружений, осадкам объектов, потере устойчивости домов и в том числе к их абсолютному разрушению, является самым каверзным свойством многолетнемерзлых грунтов [10; 12].

Льдистые грунты на самом деле многообразны и ведут себя непредсказуемо в различных пространствах залегания, несмотря на привычные всем представления. Такие грунты выделяются по степени цементации, температуре, иным свойствам и признакам. На освоенной земле Норильского промышленного района существуют льдистые грунты, разброс глубины залегания которых составляет от 10 до 400 м [2; 10; 12].

По свойствам различают твердомерзлые, пластичномерзлые, сыпучемерзлые и монолитноскользкие грунты, встречаются талики (это участки грунта, которые уже протаяли) и линзы льда. Каждый тип грунта ведёт себя по-разному как под действием нагрузки, так и при оттаивании.

Население нашей планеты встретилось с феноменом «вечная мерзлота» довольно давно. Действенно решить проблему достоверной и надёжной строительной деятельности на многолетнемерзлых грунтах и сделать настоящий высотный мегаполис с комфортным проживанием, впервые получилось лишь в Норильске в середине XX в.

Как раз на Таймыре научились применять ледяные основания в целях постройки крупных зданий и сооружений, как жилых, так и промышленных. На территории Таймыра смогли освоить технологии мониторинга за состоянием многолетнемерзлых грунтов (рис. 1).



Рис. 1. Мониторинг состояния «вечной» мерзлоты

Сейчас город претерпевает изменения в связи с разработкой новой программы по реновации. Реновация в Норильске – перечень мер, подразумевающих обновление и комплексную реконструкцию жилищного фонда [7]. Под действие данного проекта попадают жилые постройки, оказавшиеся в аварийном состоянии, не соответствующие необходимой степени благоустройства [11]. Всего до 2035 г. в Норильске предполагается строительство более 80 новых домов и снос 45 аварийных и ветхих домов [6].

Остроактуальной темой для НПР является ремонт нулевых циклов и восстановление несущей способности зданий. Дома стоят на свайном основании. В среднем эти сваи через каждые десять лет необходимо укреплять, а также делать планировку подполий. Особое внимание при этом уделяется грунту и способам его сохранения, т.е. вопросу сохранения вечной мерзлоты.

Геотермические наблюдения за состоянием грунтов оснований фундаментов под домами Норильска проводятся на постоянной основе. Специалисты Мерзлотного центра, который расположен на

базе Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского, параллельно с научной деятельностью применяют разработки на практике (рис. 2). Активное взаимодействие ведут и с коллегами из Сибирского федерального университета.



Рис. 2. Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского

Цель работы: исследование метода свайного фундирования на крайнем Севере. В ходе работы решены следующие **задачи:** изучение развития строительства на вечной мерзлоте, информации о деятельности Михаила Кима; анализ технологии, лежащей в основе строительства на вечной мерзлоте; изучение бурового способа свайного фундирования; рассмотрение современных способов сохранения вечной мерзлоты.

Ким Михаил Васильевич (1907–1970) – ученый, инженер, лауреат Ленинской премии, а также основоположник теории свайного фундирования (рис. 3). С 1936 г. Михаил Ким трудился на Норильской мерзлотной станции. Сначала работал в качестве инженера, потом стал руководителем группы, а с 1941-го – ее начальником [3]. В 1950-е гг. он трудился в проектной конторе комбината (ныне «Норильскпроект»). В декабре 1959 г. Кима перевели в Норильское отделение дирекции Красноярского НИИ

по строительству в качестве руководителя комплексной лабораторией [4]. Все эти годы он трудился над разработкой методов строительства в условиях многолетней мерзлоты.



Рис. 3. Ким Михаил Васильевич

В течение ряда лет Михаил Васильевич был преподавателем в Норильском горно-металлургическом техникуме (НГМТ). Им были написаны 42 научные работы в период с 1942-го по 1967 гг. По его трудам учатся до сих пор. 30 октября на доме №19 по Ленинскому проспекту установлена мемориальная доска Михаилу Васильевичу Киму – одному из первых норильчан, ученому, заложившему основы науки о строительстве зданий на вечномерзлых грунтах.

Самое интересное то, что с именем Михаила Васильевича непосредственно связана улица Лауреатов [1]. Название ей дали лауреаты Ленинской премии 1966 г. Ким возглавил список выдающихся норильчан, посвятивших себя строительству в условиях многолетне-мерзлых грунтов. Его соавторы нашли пути механизации, удешевления работ, ускорения строительства на территориях с суровыми климатическими условиями [12]. Из таких городов, как Воркута, Мирный, Салехард, Якутск, в Норильск приезжали строители для изучения конструкции фундамента и способа его закладки индустриальным методом, а именно с помощью буровых станков. Тяжелый творческий труд строителей,

изыскателей, исследователей, проектировщиков Норильска был отмечен медалями ВДНХ и Ленинской премией.

Следует отметить, что не случайно именно эта улица стала «Лауреатов». Здесь в начале 1950-х гг. была организована подземная лаборатория по изучению вечной мерзлоты, руководителем которой был Ким. На разных уровнях под землёй размещались комнаты, а уже в них выходили торцы забитых в землю свай. Специалисты проверяли «поведение» различных видов грунтов, помещаемых под торцы. Спустя 28 лет лабораторию затопило водой из проложенного рядом коллектора [9]. Ведущая роль в решении различных задач строительства на вечномёрзлых грунтах в НПП принадлежит Михаилу Васильевичу. Он доказал, что дома на сваях с проветриваемым подпольем при правильной эксплуатации будут стоять прочно, как на скале.

До того момента, как появился Кимовский метод, строителям для укрепления фундаментов на надёжной скальной основе необходимо было прогревать грунт и рыть котлованы глубиной до 15 и более метров [4]. Свайное фундирование было использовано и до Михаила Кима, но, прежде чем погрузить сваю в мерзлоту, приходилось оттаивать грунт. Решение, предложенное Михаилом Кимом, оказалось более простым в исполнении: отверстия для свай можно пробурить-продолбить канатно-ударными станками. Инженеру Киму удалось доказать, что более рационально сохранять мерзлоту, а не оттаивать.

С помощью уникального метода свайного фундирования буровым способом уменьшилась трудоемкость возведения фундаментов в 10 раз, их стоимость – в 2 раза [3]. Стройка стала занимать гораздо меньше времени. Свайный фундамент возводился в пять-шесть раз быстрее любого другого типа фундаментов. Сама технология возведения такого типа фундамента реализовывалась двумя путями.

Первый путь предполагал упор свай в скалу или надёжную ледяную линзу, как бы глубоко они не находились (стандартные сваи выпускались в Норильске на заводе железобетонных изделий длиной до 32 м). Второй путь реализовывался вмораживанием свай в ледяную основу, заливая шламом, при условии, что многолетняя мерзлота залегала неглубоко. К большому удивлению, данный метод не уступал по надёжности опиранию свай на скалу или глубинный лёд.

Если до «свай Кима» некоторые участки были признаны непригодными из-за глубокого залегания скального основания, то после в тех местах бурно возводились дома. Благодаря Киму, в НПП жилищное строительство очень ускори́лось и каждый год заселялось по 10 новых хрущёвок, что раньше являлось почти невозможным [4]. Причём дома вырастали в тех местах, которые раньше были забракованы из-за глубокого залегания скального основания.

В целом метод свайного фундирования, предложенный Кимом, оказался единственным способом построить на мерзлоте многоэтажный и полноценный город. Вначале свайные фундаменты были встречены скептически, но практика доказала, что именно такой метод установки фундамента надёжнее всего.

Все споры окончательно прекратились после того, как в Канаде был «законсервирован» город Аклавик, построенный на вечной мерзлоте [2]. Этот город строили одновременно с Норильском, но обычным способом, не изучая мерзлоту и не применяя передовые методы. К середине XX в. растепление оснований и эрозия грунта привели к невозможности постройки новых зданий, дорог и канализационной системы на территории. Тогда было найдено другое решение, отличающееся от Норильского. Канадское правительство предложило строительстве нового города – Инувика. Территория для постройки

этого города располагалась приблизительно за 53 км от Аклавика и уже на скальном основании (рис. 4). Туда переехали почти все жители. В Норильске же, в связи с ограниченностью выбора места расположения города, научились использовать мерзлоту как основу.



Рис. 4. Строительство нового города Инувика на скальном основании

Метод постоянно совершенствовали. «С 1958 до середины 1970-х в Норильске применяли сваи, установленные только буроопускным способом: скважину проходит станок ударно-канатного бурения, свая свободно опускается в шлам, образующийся в результате ударного бурения; шлам замерзает, плотно замоноличивая сваю в мерзлом грунте. Для замоноличивания висячих свай также применяли буровой шлам, а впоследствии – известково-песчаный раствор. Установка каждой сваи была индивидуальна. И буровой станок не съезжал с устья скважины до ее полной установки», – рассказывала городская газета «Заполярная правда» [5].

С повышением численности населения города данная технология перестала устраивать местных строителей.

Необходимы были дома повышенной этажности с уплотнительной застройкой, но пригодные для этого грунты на предназначенной для застройки территории оказались заняты. Необходимо было придумать новые конструкции

свай и технологии проходки грунтов, работая в условиях минусовой температуры. Были внедрены буронабивные сваи-стойки, благодаря которым наблюдался грандиозный эффект в сфере экономики (рис. 5).

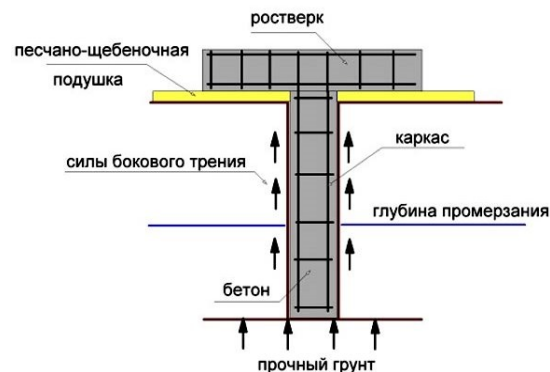


Рис. 5. Конструктивная схема буронабивной сваи-стойки

На основе этого в НПР началось бурное строительство без ограничений. Если раньше строили строго на участках, где это позволялось, то благодаря данному методу уже возводились дома там, где целесообразно их строить с точки зрения архитектуры города и многих других факторов.

Таким образом, очень быстрыми темпами пустыри в черте города исчезли.

Помимо исследований в Норильске, Михаил Ким занимался строительной наукой союзного уровня, а при составлении инструкций федерального уровня были использованы мерзлотно-грунтовые исследования норильчан (научно-исследовательского отдела Красноярского института «Промстрой НИИ проекта» и мерзлотной лаборатории комбината), те же инструкции в 60-е гг. были включены в сборники строительных норм и правил.

Закключение. В работе исследован метод свайного фундирования на Крайнем Севере. Изучено развитие строительства на вечной мерзлоте, проанализирована технология, которая легла в его основу и позволила возводить здания на вечной мерзлоте, осваивая территории, ранее считавшиеся непригодными к высотной застройке, рассмотрены современные способы сохранения вечной мерзлоты.

Старания Михаила Кима до сих пор не забыты: на данный момент метод, разработанный им, является весьма актуальным – здания на свайном фундаменте с

проветриваемым подпольем при эксплуатации по назначению будут стоять надёжно и долговечно.

Список источников

1. Кавалеры норильской славы (хронология комбината в лицах). URL: <https://memorial.krsk.ru/Public/2010/20100609.htm>

2. Как в Норильске научились строить на мерзлоте? URL: https://kislodod.life/question_answer/kak_v_norilsk_nauchilis_stroit_na_merzlote/

3. Легенды Норильска. URL: <https://gazetazp.ru/news/gorod/8334-legendyi-norilsk.html>

4. Ким Михаил Васильевич. URL: <http://muzeiludei.ru/person/kim-mihail-vasilevich.html>

5. Как Норильлаг памятник Сталину возводил. Город на сваях: как строили Норильск после ГУЛАГа. Норильск и атомная промышленность. URL: <https://magazines.gorky.media/zvezda/2018/7/kak-norillag-pamyatnik-stalinu-vozvodil-gorod-na-svayah-kak-stroili-norilsk-posle-gulaga-norilsk-i-atomnaya-promyshlennost.html>

6. «Заполярная реновация»: как изменится Норильск в ближайшем будущем? URL: <https://newslab.ru/article/1046829/>

7. Реновация жилищного фонда в Норильске в 2022 году. URL: <https://gosdocs.com/renovatsiya/zhilishhnogo-fonda-v-norilsk>

[com/renovatsiya/zhilishhnogo-fonda-v-norilsk](https://renovatsiya/zhilishhnogo-fonda-v-norilsk)

8. Свайный фундамент. URL: <https://sdelat-dom.ru/stroitelstvo/fundament/svajnyj-fundament/>

9. Ким Михаил Васильевич. URL: <https://norillag.livejournal.com/96158.html?ysclid=l1dxmed54u>

10. Техническая эксплуатация зданий и сооружений на севере Красноярского края: монография. Ч. 1. / В.Ю. Сетков, Т.Р. Гамидов, Н.А. Губина, А.Г.-о Керимов, И.П. Кардашев, А.А. Копылов, В.В. Копылов, В.П. Пикулев, Н.А. Прищепова, О.П. Рысева, Ж.А. Старостина; Норильский индустр.ин-т. Норильск, 2005. 229 с.

11. Рысева О.П., Керимов А.Г., Умнова Е.В. Направления реновации жилого фонда в Норильске // Научный вестник Арктики. 2018. №4.

12. Проблемы экологии и рационального использования ресурсов в суровых условиях Заполярья: монография / М.А. Елесин, Н.А. Губина, О.П. Рысева, Н.В. Кармановская, О.В. Носова; Норильский гос. индустр.ин-т. Норильск: НГИИ, 2019. 193 с.

References

1. Cavaliers of Norilsk glory (chronology of the combine in persons). URL: <https://memorial.krsk.ru/Public/2010/20100609.htm>

2. How did Norilsk learn to build on permafrost? URL: https://kislodod.life/question_answer/kak_v_norilsk_nauchilis_stroit_na_merzlote/

3. Legends of Norilsk. URL: <https://gazetazp.ru/news/gorod/8334-legendyi-norilsk.html>

4. Kim Mikhail Vasilyevich. URL: <http://muzeiludei.ru/person/kim-mihail-vasilevich.html>

5. How Norilsk erected a monument to Stalin. City on stilts: how to build Norilsk after the Gulag. Norilsk and the atomic industry. URL: <https://magazines.gorky.media/zvezda/2018/7/kak-norillag-pamyatnik-stalinu-vozvodil-gorod-na-svayah-kak-stroili-norilsk>

posle-gulaga-norilsk-i-atomnaya-promyshlennost.html

6. «Polar renovation»: how will Norilsk change in the near future? URL: <https://newslab.ru/article/1046829/>

7. Renovation of the housing stock in Norilsk in 2022. URL: <https://gosdocs.com/renovatsiya/zhilishhnogo-fonda-v-norilsk>

[ke](https://sdelat-dom.ru/stroitelstvo/fundament/svajnyj-fundament/)

8. Pile foundation. URL: <https://sdelat-dom.ru/stroitelstvo/fundament/svajnyj-fundament/>

9. Kimmikhailvasilevich. URL: <https://norillag.livejournal.com/96158.html?ysclid=l1dxmed54u>

10. Technical operation of buildings and structures in the north of the Krasnoyarsk Territory: monograph. Part 1. / V.Yu. Setkov, T.R. Gamidov, N.A. Gubina, A.G.-o Kerimov, I.P. Kardashev, A.A. Kopylov, V.V. Kopylov,

V.P. Pikulev, N.A. Prishchepova, O.P. Ryseva, J.A. Starostina; Norilsk indu-p.in-T. Norilsk, 2005. 229 p.

11. Ryseva O.P., Kerimov A.G., Umnova E.V. Directions of renovation of housing stock in Norilsk. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2018;(4):33–42.

12. Problems of ecology and rational use of resources in the harsh conditions of the Arctic: monograph / M.A. Yelesin, N.A. Gubina, O.P. Ryseva, N.V. Karmanovskaya, O.V. Nosova; Norilsk State University. Norilsk: NGII, 2019. 193 p.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 64–72.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):64–72.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья
УДК 624.15:(551.345:551.583)
doi: 10.52978/25421220_2022_12_64–72

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ
В СВЯЗИ С ГЛОБАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА:
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ**

Михаил Николаевич Царапов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.
E-mail: tsarapov@geol.msu.ru

Аннотация. Показана возрастающая актуальность исследований и разработки новых методов работы оснований зданий, расположенных в зоне распространения мерзлых грунтов. Отдельные факторы, которые серьёзно влияют на устойчивость оснований инженерных сооружений – изменение климата, недочеты строительства и неграмотная эксплуатация.

Ключевые слова: грунт, климат, деформация, система мониторинга, термостабилизаторы, SmartGTM.

Для цитирования: Царапов М.Н. Трансформация оснований зданий в криолитозоне в связи с глобальным изменением климата: проблемы и пути решения // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 64–72. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_64–72.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**TRANSFORMATION OF BUILDING SUBSTRATES
IN THE CRYOLITHOZONE DUE TO GLOBAL CLIMATE CHANGE:
PROBLEMS AND SOLUTIONS**

Mikhail N. Tsarapov

Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia.
E-mail: tsarapov@geol.msu.ru

Abstract. The role of research and development for infrastructure facilities in permafrost is shown. Individual factors that seriously affect the infrastructure stability are climate change, construction shortcoming and illiterate operation.

Keywords: soil, climate, deformation, monitoring system, heat stabilizers, SmartGTM.

For citation: Tsarapov M.N. Transformation of building foundations in the Cryolithozone in connection with Global Climate Change: Problems and Solutions. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):64–72. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_22_12_64–72.

В XXI в. с развитием цифровых технологий, которые позволяют непрерывно и одновременно вести наблюдения за большим количеством параметров природной среды, многими исследовательскими организациями в области мониторинга климата планеты отмечается явное изменение температуры воздуха. В Российской Федерации данный фактор имеет значимый характер, так как более чем на 65% территории распространены мёрзлые породы (рис. 1), состояние которых существенно зависит от изменения климата и является определяющим фактором, влияющим на надежность всей инфраструктуры нефтегазодобывающей отрасли и других предприятий, занимающихся добычей природных ресурсов. Как отмечает ряд авторитетных ученых, наиболее явным последствием изменения климата (в последние десятилетия в северных регионах наблюдается потепление) будет деградация многолетнемерзлых грунтов, являющихся основаниями инженерных сооружений.

В связи с этим актуальным становится вопрос о трансформации оснований всех инженерных сооружений, расположенных в криолитозоне, с целью их надежной работы и обеспечения устойчивости к изменению климатических условий.

Одним из глобальных последствий деградации мерзлых грунтов является то, что изменятся условия работы оснований инженерных сооружений, которые проектировались без учета глобального изменения климата.

В 2018 г. было опубликовано распоряжение Правительства РФ с утвержденным национальным планом мероприятий адаптации к изменениям климата [9]. Согласно данному документу, к одной из семи выделенных проблем отрицательных последствий изменения климата относится деградация вечной мерзлоты в северных районах с ущербом для инженерных сооружений.

Исходя из государственной важности существующей проблемы, которая серьезно повлияет на сохранение национальной безопасности нашей страны, в лаборатории инженерной геокриологии и механики мерзлых грунтов были продолжены исследования по трансформации мерзлых грунтов как оснований зданий.

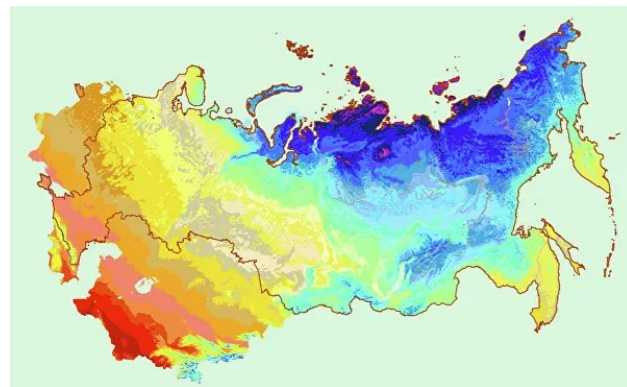


Рис. 1. Карта среднегодовых температур горных пород России и сопредельных государств. Зоны вечной мерзлоты, где эти температуры ниже нуля градусов Цельсия, обозначены зеленым и синим цветами (© кафедра геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова)

Данные исследования проводились по следующим направлениям: разработка вариантов применения термостабилизаторов, изучение изменения физических и механических свойств мерзлых грунтов. Целью исследований было устранение тех существующих пробелов в обеспечении устойчивости грунтов оснований, которые, с нашей точки зрения, в значительной степени влияют на прогноз изменения их напряженно-деформированного состояния как оснований инженерных сооружений.

Данные направления исследований выбраны неслучайно, по следующим соображениям. Согласно нормативным документам (СНиП 2.02.01.83 СНиП 2.01.07.85, СНиП 2.02.04.88), в зависимости от класса и назначения сооружений, условий работы оснований коэффициент запаса изменяется от 1,05 до 1,56. Приведенные значения коэффициента запаса означают, что в результате изменения температуры мёрзлых грунтов не-

сущая способность основания уменьшается на величину от 5 до 56 процентов от начальной, заложенной в проекте. Указанные данные свидетельствуют о том, что изменение температуры приведет к изменению прочности грунтов основания и может стать одним из факторов, способствующих разрушению всего инженерного сооружения.

Расчеты, проведенные на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, показывают, что при коэффициенте запаса 1,56 к 2060 г. основания существующей инфраструктуры в таких городах, как Воркута, Надым, Норильск, не останутся надежными в условиях глобального потепления климата [12]. По данным [6], число аварийных сооружений в крупных городах Севера России составляет: Магадан – 55%, Чита – 60%, Дудинка – 35%, Норильск – 15% и т.д. При этом за последнее десятилетие аварийность зданий в районах криолитозоны существенно возросла: в Норильске – до 42%, Якутске – до 61%, в Адарме – до 90%. На транспортных объектах, расположенных в районах криолитозоны, также наблюдается рост аварийности. Если в 90-х гг. XX в. по причине оттаивания мёрзлых грунтов отмечалось 10–16% аварийности земляных полотен железных и автомобильных дорог, то сейчас эта цифра выросла по оценкам исследователей до 46%. В настоящее время более половины всех взлётно-посадочных полос городов Норильск, Магадан, Воркута находятся в аварийном состоянии.

Следует отметить тот факт, что причиной деформации грунтов оснований инженерных сооружений и роста аварийности в районах распространения мерзлых грунтов является не только глобальное изменение климата, а прежде всего некачественное строительство и плохая эксплуатация. Оценка данных факторов требует отдельного научно-технического исследования при должном финансировании всех заинтересо-

ванных сторон и принятии соответствующих решений. Анализ аварийности и причин деформаций сооружений в районе криолитозоны, проведённый Я.И. Кроником, показал, что 22% аварий происходит по вине проектировщиков, 33% – по вине строителей и 45% – по вине эксплуатационников [6].

В рамках научных исследований, основанных на опыте участия в строительстве инженерных сооружений в различных районах Севера России, выделены основные проблемы, на которых хочется остановиться ниже.

К наиболее важным направлениям исследований относятся: возможные сценарии и количественные оценки глобальных и региональных изменений климата; мониторинг за температурами воздуха и грунтов оснований инженерных сооружений; прогноз изменения свойств грунтов. Основной принцип, использованный в исследованиях, основан на том, что данные результаты должны быть увязаны между собой и являться основой для принятия инженерных решений при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.

В рамках выделенных направлений были получены следующие результаты.

Как известно, в настоящее время в строительной практике на мерзлых грунтах в России применяются два принципа. Первый принцип – это использование грунтов с сохранением в мерзлом состоянии, второй принцип заключается в их использовании в талом и оттаивающем состоянии. В городе Норильске и на всей расположенной вокруг него инфраструктуре в основном применен первый принцип, который для обеспечения устойчивости позволяет стабилизировать верхнюю границу мерзлых грунтов на первоначальном естественном основании. В этом принципе отмечаются 4 основных способа: с сохранением грунтов в мерзлом состоянии; с предварительным охлаждением и промораживанием грунтов оснований; с промораживанием грунтов оснований в

процессе строительства и эксплуатации зданий; с допущением ограниченного оттаивания мерзлых грунтов выше подошвы фундаментов [7].

Надо отметить, что концентрация зданий и сооружений, расположенных на мерзлых грунтах, является очагами техногенного влияния на природную обстановку, которая приводит к развитию опасных процессов, существенно влияющих на устойчивость инженерных сооружений. Основным фактором, определяющим устойчивость инженерных сооружений, является изменение температуры воздуха, а соответственно, и температуры грунтов. Поэтому на первый план выходит необходимость мониторинга изменения температурного режима грунтов оснований.

Норильский промышленный район включает в себя города Норильск, районы Кайеркан, Талнах, Оганер и поселок Снежногорск. По наблюдениям, на данной территории происходит деградация многолетнемерзлых грунтов, которая сопровождается повышением их температуры и увеличением мощности сезонного оттаивания. По опубликованным данным, за последние 30 лет температура грунтов на глубине до 60 м повысилась на 0,5 градуса [2]. По результатам исследований отмечено, что к основным факторам, которые влияют на повышение температуры грунтов, относятся нарушения правил эксплуатации и снегонакопление. Данные нарушения приводят к образованию обширных зон оттаивающих грунтов, то есть изменению их прочностных и деформационных свойств, а это приводит к потере устойчивости инженерных сооружений.

Для получения своевременной информации по изменению температуры грунтов выпускниками кафедры геокриологии была разработана автоматизированная система мониторинга за температурным режимом. Данная SmartGTM (рис. 2) платформа позволяет

проводить сбор, накопление и хранение результатов мониторинга температуры, делать визуализацию информации в удобной форме в виде наглядных графиков и карт. Графическое отображение тенденций динамики с помощью линий тренда позволяет сопоставлять реальные значения по данным температур с проектными.

В случае приближения контролируемого параметра к критической отметке система в автоматическом режиме проведет онлайн-оповещение пользователя. Преимуществом разработанной системы мониторинга является формирование базы данных для хранения любой технической документации объекта наблюдения с формированием единого информационного пространства для всех сторон, заинтересованных в результатах исследований и наблюдений. SmartGTM платформа позволяет также производить импорт данных наблюдаемых параметров грунтов оснований, полученных от сторонних производителей, с возможностью формирования отчетов с экспортом во все общедоступные форматы.

Нужно отметить, что данная система уже используется на объектах города Норильска (рис. 3). Автоматизированная система мониторинга температуры грунтов применяется на плотине (г. Норильск). В состав системы мониторинга входит комплект термокос, логгер, блок сбора данных и обрабатывающая программа SmartGTM ООО «РУСГЕОТЕХ» (www.rgtekh.ru).

Следующим важным направлением исследований является установление закономерностей формирования деформаций и прочности мерзлых и оттаивающих грунтов, которые позволяют получить необходимые данные для определения несущей способности оснований сооружений и разработать мероприятия, предотвращающие их негативное влияние [7].

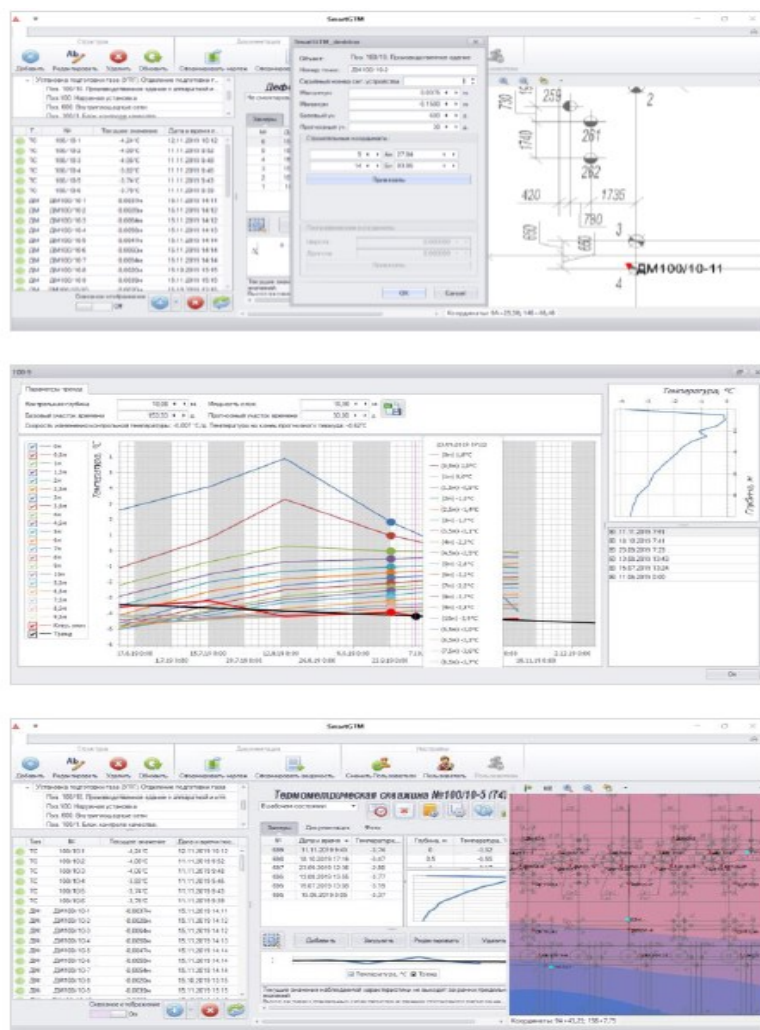


Рис. 2. Визуализация данных работы SmartGTM платформы
(предоставлено ООО «РУСГЕОТЕХ», www.rgtekh.ru)



Рис. 3. Пример использования системы мониторинга на конкретном объекте города Норильска
(предоставлено ООО «РУСГЕОТЕХ», www.rgtekh.ru)

К настоящему времени установлены основные закономерности формирования деформаций и прочности в зависимости от температуры, состава, физических свойств, проявления реологических процессов. Регламентированы принципы использования мерзлых грунтов в качестве оснований, разработаны нормативные документы на изыскания, определение расчетных характеристик, проектирование, технологию возведения и эксплуатации сооружений

Сотрудники кафедры геокриологии участвовали в разработке и обновлении государственных стандартов по испытаниям мерзлых и оттаивающих грунтов, в их числе: ГОСТ 12248-2020, ГОСТ 20276.3-2020, ГОСТ 24847-2017, ГОСТ 25100-2020, ГОСТ 25358-2020, ГОСТ 26262-2014, ГОСТ 27217-2012, ГОСТ 28622-2012, ГОСТ Р 56726-2015, ГОСТ Р 59537-2021, ГОСТ Р 59540-2021, ГОСТ Р 59596-2021, ГОСТ Р 59597-2021. Следует отметить, что в данном случае сотрудники кафедры привлекались в качестве консультантов, поэтому многие их замечания и предложения не были учтены в указанных нормативах.

Отмеченные результаты исследований позволяют строить в области криолитозоны города с многоэтажной застройкой, отвечающие требованиям современного благоустройства, возводить и эксплуатировать промышленные и транспортные объекты. При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований в мерзлом состоянии в процессе строительства и эксплуатации сооружений основные конструктивные решения направлены на обеспечение расчетного температурного режима грунтов. В практике строительства широкое применение нашли свайные фундаменты, позволяющие технологично устраивать проветриваемые подполья. Большие в плане сооружения с тяжелыми нагрузками на полы (ангары, гаражи, овощехранилища, цеха промышленных объектов и т.д.) возводятся на

подсыпках с каналами, вентилируемыми холодным воздухом в зимний период. Для обеспечения заданного температурного режима грунтов оснований используются термостабилизаторы, применяются тепловые насосы.

В лаборатории инженерной геокриологии и механики мерзлых грунтов продолжены исследования физических, механических, фильтрационных свойств мерзлых и оттаивающих грунтов.

В настоящее время разработана методика трехосного сжатия оттаивающих грунтов. Основные положения опубликованы в работах [3; 4; 13; 14]. Отдельной проблемой на данный момент остается разработка методики учета влияния динамических нагрузок на свойства оттаивающих грунтов в условиях трехосных испытаний. Акценты и основные замечания по разработке и применению стандартных методов исследований мерзлых и оттаивающих грунтов приведены в работе [10].

Хочется отметить, что отдельным достижением в исследованиях мерзлых и оттаивающих грунтов стала разработка методики определения коэффициента фильтрации оттаивающего грунта с возможностью фиксации его изменения во времени. Суть данной методики заключается в следующем. Определение коэффициента фильтрации проводится в приборе трехосного сжатия с определенной модификацией, предложенной сотрудниками лаборатории. Образец мерзлого грунта помещается в камеру. Затем производится оттаивание грунта при осевых давлениях, соответствующих природным условиям. Давление в камере поддерживается гидравлическим нагнетателем с встроенной системой измерения расхода воды. Гидравлический градиент создается разностью высоты водяного столба в пьезометрах. Затем проводится насыщение образца обратным давлением. Консолидация образца выполняется путем поднятия полного всестороннего напряжения до величины, равной сумме всестороннего

напряжения, достигнутого на этапе водонасыщения образца, и выбранному значению эффективного напряжения консолидации. Фильтрация начинается с момента появления разности давлений притока/оттока. В ходе опыта необходимо вести журнал с фиксацией высоты столба воды в пьезометрах и температуры. Данная схема проработана, смонтирована и адаптирована инженером Д.С. Морозовым (рис. 4).

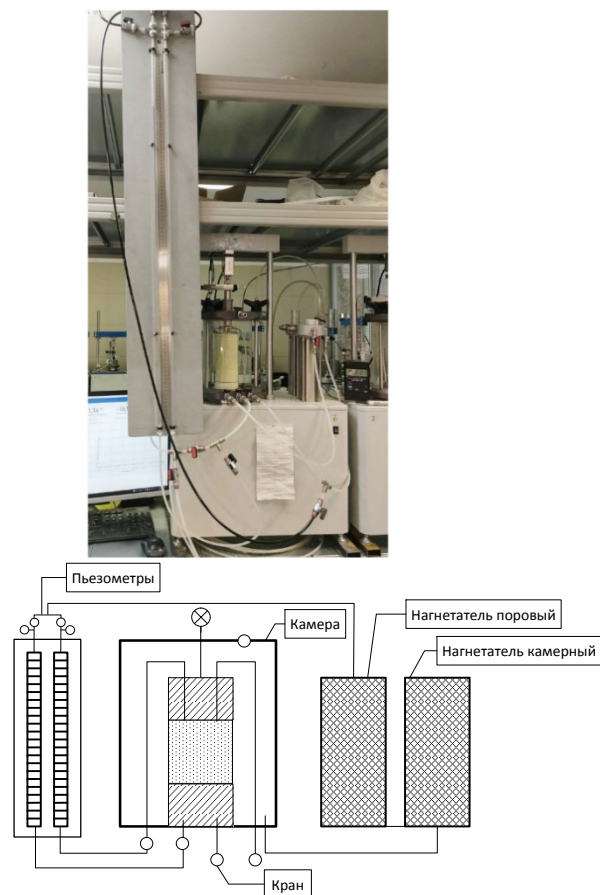


Рис. 4. Прибор по определению коэффициента фильтрации оттаивающих грунтов

Также в лаборатории под руководством П.И. Котова ведутся работы по установлению корреляций между геофизическими параметрами и прочностными характеристиками мерзлых грунтов. На основании проведенных экспериментальных исследований выявлены корреляционные взаимосвязи между механическими, электрическими и акустическими характеристиками мерзлых грунтов массивной криогенной текстуры различной степени засоленности и тем-

пературы. Предложена методика прогноза прочностных характеристик по удельному электрическому сопротивлению [5]. Применение данной методики может существенно усовершенствовать процесс мониторинга и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов.

Разработка и внедрение методов, приведенных выше, позволяет сохранять и прогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов в заданном в проекте температурном режиме. В настоящее время основным способом поддержания температуры вокруг фундаментов инженерных сооружений является метод термостабилизации [11]. Метод основан на применении специальных технических устройств – термостабилизаторов. Принцип действия приведен на рис. 5.

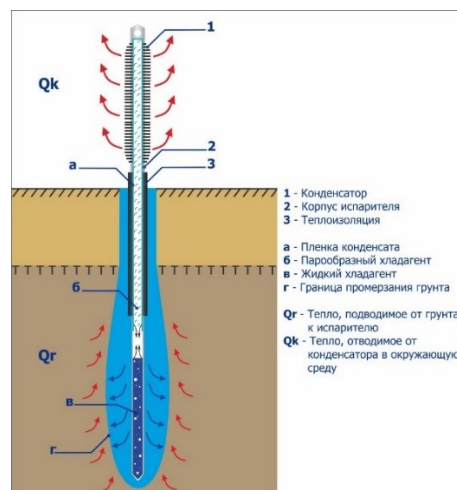


Рис. 5. Принцип действия термостабилизатора

Кафедрой геокриологии в настоящее время ведутся разработки новых конструкций термостабилизаторов. Опытные испытания проводятся на протяжении пяти лет на Звенигородском полигоне (База МГУ).

Вывод. Дальнейшие задачи геотехники в районах распространения многолетнемерзлых грунтов должны решаться на государственном уровне с стабильными источниками финансирования научных исследований. Это позволит создать, обустроить и поддерживать систему мониторинга за состоянием температурного режима всех инженерных сооружений, построенных в районах распространения мерзлых грунтов, с учётом

изменения климата планеты, обеспечить их безопасную эксплуатацию. Особое внимание при этом должно уделяться разработке и внедрению новых методов мониторинга температурного режима грунтов, углублению теоретических и экспериментальных исследований природы прочности и деформаций оттаивающих грунтов, совершенствованию методов определения меняющегося во времени напряженно-деформированного состояния в результате теплового и механического воздействия на них техногенных и криогенных процессов, повышению достоверности определения несущей способности оснований сооружений.

Список источников

1. ГОСТ 12248.11–2020. Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза.
2. Гребенец В.И., Садовский А.В. Потепление климата и тепловой режим основания северного города // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. №5. С. 27–30.
3. Кальбергенов Р.Г., Котов П.И., Царапов М.Н. Определение деформационных характеристик оттаивающих грунтов методом трехосного сжатия // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. №1. С. 28–32.
4. Кальбергенов, Р.Г., Леонов А.Р. Современные методы исследования механических свойств оттаивающих грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. №10. С. 22–23.
5. Котов П.И., Агапкин И.А. Корреляция между геофизическими параметрами и прочностными характеристиками мерзлых грунтов различной засоленности // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. №1. С. 14–19.
6. Кроник Я.А. Аварийность и безопасность природно-технических систем в криолитозоне // Труды Второй конференции геокриологов России. Т. 4. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 138–146.
7. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.
8. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л.Т. Роман, М.Н. Царапов [и др.]. М.: Университетская книга, 2018. 188с.
9. Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г.: Распоряжение Правительства РФ от 25 декабря 2019 г. №3183–р.
10. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. 426 с.
11. Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005.
12. Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях изменяющегося климата. М.: Университетская книга, 2011. 260 с.
13. Царапов М.Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге: дис. ... на соиск. учен. степ. канд. г.-м. наук (18.05.07); МГУ. М., 2007. 136 с.
14. Царапов М.Н. Оценка устойчивости оттаивающих откосов по испытаниям грунтов на трехосное сжатие // Путь и путевое хозяйство. 2022. Т. 2. №2. С. 8–18.

References

1. GOST 12248.11–2020. Soils. Determination of the strength characteristics of thawing soils by the cut-off method.
2. Grebenets V.I., Sadovsky A.V. Climate warming and thermal regime of the northern city foundation. *Foundations, foundations and mechanics of soils*. 1993;(5):27–30.
3. Kalbergenov R.G., Kotov P.I., Tsarapov M.N. Determination of deformation characteristics of thawing soils by triaxial compression. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2019;(1):28–32.
4. Kalbergenov, R.G., Leonov A.R. Modern methods of investigation of mechanical properties of thawing soils. *Industrial and civil construction*. 2003;(10):22–23.
5. Kotov P.I., Agapkin I.A. Correlation between geophysical parameters and strength characteristics of frozen soils of various salinity. *Foundations, foundations and mechanics of grunt*. 2021;(1):14–19.
6. Kronik Ya.A. Accident rate and safety-the nature of natural-technical systems in the cryolithozone // Proceedings of the Second Conference of geocryologists of Russia. Vol. 4. M.: Publishing House of Moscow State University, 2001. pp. 138–146.
7. Fundamentals of geocryology. Ch. 5. Engineering geocryology / ed. by E.D. Ershova. M.: Publishing House of Moscow State University, 1999. 526 p.
8. Manual for determining the physico-mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils / L.T. Roman, M.N. Tsarapov [et al.]. M.: University Book, 2018. 188 c.
9. On the approval of the national plan of measures of the first stage of adaptation to climate change for the period up to 2022 G.: Decree of the Government of the Russian Federation dated December 25, 2019 No. 3183–R.
10. Roman L.T. Mechanics of frozen soils. M.: MAIK «Science/Interperiodica», 2002. 426 p.
11. Khrustalev L.N. Fundamentals of geotechnics in the cryolithozone: textbook. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2005.
12. Khrustalev L.N., Parmuzin S.Yu., Emelyanova L.V. Reliability of the northern infrastructure in a changing climate. Moscow: University Book, 2011. 260 p.
13. Tsarapov M.N. Regularities of the formation of strength characteristics of thawing soils during shear: dis. ...on the job. learned. step. Candidate of G.-M. Sciences (18.05.07); Moscow State University. M., 2007. 136 p.
14. Tsarapov M.N. Assessment of the stability of thawing slopes by testing soils for triaxial compression // *Path and field economy*. 2022;2(2):8–18.

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 73–77.

Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):73–77.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 691.11

doi: 10.52978/25421220_2022_12_73–77

**СТАБИЛИЗИРОВАНИЕ КРУПНОФОРМАТНОЙ ДРЕВЕСИНЫ
ДЛЯ МАЛОЭТАЖНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ И РЕСТАВРАЦИИ
ПАМЯТНИКОВ ДЕРЕВЯННОГО ЗОДЧЕСТВА**

Сергей Александрович Громов¹, Михаил Анатольевич Елесин²,
Николай Алексеевич Машкин³, Александр Сергеевич Беспалов⁴

¹Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия.

E-mail: gromov@catalysis.ru.

²Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск, Россия.

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

E-mail: nmashkin@yandex.ru.

⁴РОСТ, г. Бердск, Россия.

Аннотация. Рассмотрены инновационные методы обработки древесины для эффективного применения в малоэтажном домостроении и при реставрации памятников деревянного зодчества Сибири. Для улучшения технических характеристик элементов вновь строящихся и реставрируемых деревянных зданий предложены экологичные технологии термохимического и термического модифицирования древесины. Показаны возможности расширения сферы применения древесного сырья в производстве древесно-полимерных композитов.

Ключевые слова: модифицированная древесина, термодревесина, малоэтажное домостроение, деревянное зодчество.

Для цитирования: Стабилизирование крупноформатной древесины для малоэтажного домостроения и реставрации памятников деревянного зодчества / С.А. Громов, М.А. Елесин, Н.А. Машкин, А.С. Беспалов // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 73–77. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_73–77.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**STABILIZATION OF LARGE-FORMAT WOOD
FOR LOW-RISE HOUSING CONSTRUCTION AND RESTORATION
MONUMENTS OF WOODEN ARCHITECTURE**

Sergey A. Gromov¹, Mikhail A. Yelesin²,
Nikolay A. Mashkin³, Alexander S. Bespalov⁴

¹Yugorsky State University, Khanty-Mansiysk, Russia.

E-mail: gromov@catalysis.ru.

²N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia.

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: nmashkin@yandex.ru.

⁴GROWTH, Berdsk, Russia.

Abstract. Innovative methods of wood processing for effective use in low-rise housing construction and restoration of monuments of wooden architecture of Siberia are considered. Eco-friendly technologies of thermochemical and thermal modification of wood are proposed to improve the technical characteristics of elements of newly constructed and restored wooden buildings. The possibilities of expanding the scope of application of wood raw materials in the production of wood-polymer composites are shown.

Keywords: modified wood, thermal wood, low-rise housing construction, wooden architecture.

For citation: Stabilization of large-format wood for low-rise housing construction and restoration of monuments of wooden architecture / S.A. Gromov, M.A. Elesin, N.A. Mashkin, A.S. Bepalov. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):73–77. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_73-77.

Более трети индивидуальных домов в Западной Сибири строятся с широким использованием пило- и лесоматериалов, а конструкции чердачных перекрытий практически на 100% выполняются из древесины. В целом по России за год производится более 20 млн. м³ пиломатериалов строительного назначения. Вероятно, что данная тенденция будет сохраняться и дальше.

Это показывает перспективность расширения производства изделий и конструкций из древесины для малоэтажного домостроения, в том числе термодревесины и древесно-полимерных композитов, которые способны успешно конкурировать на строительном рынке, заменяя менее качественную натуральную древесину. Заинтересованность населения в деревянном домостроении в последнее время не снижается, а растет на 2–3% в год.

Древесина также используется при реставрации памятников деревянного зодчества (рис. 1). Технологии стабилизации и модифицирования позволяют увеличить срок службы древесины, из которой изготовлены несущие и ограждающие конструкции таких зданий. В условиях растущей агрессивности эксплуатационной среды и отсутствии надлежащего своевременного ремонта

архитектурные памятники неотвратимо разрушаются.



Рис. 1. Деревянное здание в Новосибирске (около 1900 г.)

В то же время процессы разрушения древесины под действием окружающей среды могут быть замедлены при использовании различных консервирующих средств, а также методов высокотемпературной сушки (стабилизации) древесины [1]. По данным производителей стабилизированной термодревесины (по Интернет-источникам), цены на блок-хаусы (имитация бревна) и террасную доску составляют 50–60 тыс. руб. за 1 м³. Точных статистических данных по объемам продаж термодревесины нет, но можно предположить, что ее доля в общем объеме строительных пило-

и лесоматериалов достигает 2–3%. В целом по России это может составить до 0,4–0,5 млн. м³ в год.

К настоящему времени глубоко исследованы вопросы сушки и модифицирования древесины лиственных и хвойных пород для использования в малоэтажном строительстве, а также в конструкциях спортивных залов, бассейнов, хранилищ химикатов и удобрений, градилен, шахтной крепи, очистных сооружений, при сохранении памятников деревянного зодчества [1–4]. Определены параметры сушки и модифицирования древесины (толщиной до 50–60 мм), исследованы физико-механические свойства высушенной и модифицированной древесины, определены показатели химической стойкости и долговечности в различных эксплуатационных условиях.

Известно значительное количество эффективных консервантов древесины, а также технологий консервирования: использование консервирующих газов, диффузионные способы, модифицирование древесины после предварительной разборки зданий [2]. Проблема реставрации старинных зданий представляет важность и для памятников деревянного зодчества города Новосибирска, особенностью которых является достаточно высокий уровень сохранности, так как они имеют относительно «молодой» возраст (около 120 лет).

Разработаны атмосферостойкие защитные составы и методы повышения долговечности памятников деревянного зодчества с использованием технологий модифицирования древесины синтетическими полимерами (фенолоформальдегидными, эпоксидными и др.) [3]. Можно также рекомендовать в качестве эффективных гидрофобизаторов-модификаторов деревянных элементов архитектурных памятников защитные составы на основе этилсиликата калия (АКВАСИЛ) и бутадиен-стирольного латекса СКС–65 ГП [4].

Процесс модифицирования древесины кремнийорганическими гидрофобизаторами можно разделить на следующие стадии:

- гидролиз гидролитически неустойчивых связей, входящих в состав кремнийорганического соединения, под действием воды, связанной с поверхностью, образование силанолов;
- адсорбция и взаимодействие продуктов гидролиза с окисями и гидроокисями поверхности, поликонденсация.

В результате образуется мономолекулярный слой силоксана толщиной порядка $4,0\text{--}7,8 \cdot 10^{-10}$ м, в котором органические радикалы химически связаны с поверхностью через атомы кремния и ориентированы наружу, придавая ей гидрофобные свойства.

Модификаторы древесины на основе кремнийорганических соединений являются более эффективными, чем другие органические аналоги, а их отличительными свойствами являются высокая реакционная способность, малая зависимость физико-механических свойств от температуры, высокая стойкость к термической и термоокислительной деградации, морозостойкость. Кремнийорганические соединения обладают достаточной стойкостью к действию слабых кислот и щелочей, многих растворителей, топлив и минеральных масел [5].

Наиболее экономичными и технологически удобными для поверхностной обработки поверхности деревянных конструкций являются метилсиликонаты щелочных металлов (метилсиликонат калия – МСК) – водорастворимые кремнийорганические соединения, которые не требуют использования органических растворителей или приготовления эмульсий, применяются в виде разбавленных водных растворов и являются наиболее дешевыми из всех кремнийорганических продуктов [4]. Побочными продуктами, образующимися в результате реакции карбонизации щелочи углекислым газом воздуха, являются не-

токсичные соединения – карбонаты калия. Катализатором химических процессов гидролиза и поликонденсации таких кремнийорганических соединений является углекислый газ воздуха, поэтому метилсиликонаты щелочных металлов можно назвать достаточно универсальными гидрофобизаторами-модификаторами древесины.

В современном строительстве деревянных зданий и сооружений широко используются различные способы сушки лесо- и пиломатериалов, в том числе и высокотемпературная сушка. Высокотемпературная сушка с получением термомодифицированной древесины толщиной до 50 мм применяется для изготовления широко представленной на рынке палубной доски, вагонки. Получены также данные о влиянии высокотемпературной сушки на структуру и свойства крупноформатной древесины, для получения высококачественных материалов и изделий из цельной древесины (бревно, брус), обладающих высокой формостабильностью, эксплуатационной стойкостью и долговечностью [1; 2]. Такая древесина востребована при малоэтажном индивидуальном и индустриальном строительстве и при сохранении памятников деревянного зодчества.

При реставрации памятников деревянного зодчества, помимо защитной обработки несущих и ограждающих элементов здания, может возникнуть необходимость замены части деревянного сруба, особенно его нижних венцов, пришедших при многолетней эксплуатации в полную негодность. В этом случае можно применить термомодифицированную древесину (термодревесину) [6].

Термодревесина – это особый вид стабилизированного древесного материала, заданные физико-механические характеристики которого достигаются путем термической обработки древесины по особым высокотемпературным технологиям (рис. 2). Возможность использования термодревесины для малоэтажного

домостроения и при реставрации памятников деревянного зодчества обусловлена ее высокими показателями надежности и долговечности при относительно доступной цене. Кроме того, в процессе изготовления стабилизированной термодревесины (бревно, брус, доска) не требуется применение дополнительных химических добавок, что делает такую древесину экологичным и безопасным для здоровья материалом.



Рис. 2. Установка для высокотемпературной сушки бревен

В процессе производства стабилизированной термодревесины под воздействием высокой температуры меняется клеточная структура древесины. Изначально древесные волокна состоят:

- из целлюлозы (40–58%) – определяет эластичность и прочность дерева;
- лигнина (20–50%) – обеспечивает одревеснение на клеточном уровне;
- гемицеллюлоз (15–38%) – оказывают цементирующее воздействие на стенки древесных клеток;
- экстрактивных веществ (0,8–6,9%) – определяют ароматические, цветовые и т.п. характеристики древесины.

Продолжительное воздействие на древесину высокой температуры (135–240 °С) приводит к распаду гемицеллюлоз, благодаря чему древесина несколько уменьшается в объеме и меньше впитывает влагу, но и становится маловосприимчивой к воздействию бактерий и грибов. При дальнейшем увеличении температуры происходит изменение целлюлозной структуры, благодаря чему термодревесина стабилизируется и

в дальнейшем не деформируется даже при многолетней эксплуатации в среде с повышенной влажностью.

В настоящее время в ООО «РОСТ» (г. Бердск) разработана технология высокотемпературной сушки (термомодифицирования) крупноразмерного сортамента лесо- и пиломатериалов без трещинообразования, с повышенной формостабильностью и эксплуатационной стойкостью при атмосферных воздействиях. Такая крупноразмерная стабилизированная термодревесина предназначена для использования в малоэтажном строительстве и при реставрации памятников деревянного зодчества.

Заключение. Исследованиями установлено, что применение для модифицирования древесины составов на основе силиконата калия (АКВАСИЛ) позволяет улучшить физико-механические свойства и атмосферостойкость древесины, что повысит качество и долговечность деревянных конструкций в малоэтажном домостроении.

В малоэтажном домостроении и при реставрации памятников деревянного зодчества можно рекомендовать использовать стабилизированную термодревесину, например, при необходимости замены части деревянного сруба памятников архитектуры, особенно сильно изношенных нижних венцов.

Список источников

1. Hidropfobic Modifids for Restoration of Old Wooden Building in Westen Sibiria / B.V. Krutasov, M.A. Ylesin, N.A. Mashkin, D.V. Dubrov // Functional Materials and Processing Technologies 11. Key Engineering Materials. Vol. 771. 2018. S. 43–48.

2. Покровская Е.Н. Химико-физические основы увеличения долговечности древесины. Сохранение памятников деревянного зодчества с помощью элементоорганических соединений. М: АСВ, 2009. 136 с.

3. Машкин Н.А. Эксплуатационная стойкость модифицированной древесины в строительных изделиях. Новосибирск: НГАСУ, 2001. 260 с.

4. The use of modified wood in the construction of wastewater treatment plants in coal mines of Kuzbass / M.A. Elesin, N.A. Mashkin, B.V. Krutasov, N.V. Karmanovskaya // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. 2021. Т. 17. №4. Р. 739–746.

5. Соболевский М.В., Моцарев Г.В., Розенберг В.Р. Карбофункциональные органосиланы и органосилоксаны. М.: Химия, 1990. 236 с.

6. Интернет-ресурсы. URL: <http://www.termo-wood.ru/>, <http://www.woodtrade.ru/>, <http://www.bestreferat.ru/>, <http://forums.wood.ru/>, <http://www.reznoe.ru/>.

References

1. Hidropfobic Modifids for Restoration of Old Wooden Building in Westen Sibiria / B.V. Krutasov, M.A. Ylesin, N.A. Mashkin, D.V. Dubrov // Functional Materials and Processing Technologies 11. Key Engineering Materials. Vol. 771. 2018. S. 43–48.

2. Pokrovskaya E.N. Chemical and physical bases of increasing durability properties of wood. Preservation of monuments of wooden architecture with the help of organoelement compounds. M: ASV. 2009. 136 p.

3. Mashkin N.A. Operational resistance of modified wood in construction products. Novosibirsk: NGASU, 2001. 260 p.

4. The use of modified wood in the construction of wastewater treatment plants in coal mines of Kuzbass / M.A. Elesin, N.A. Mashkin, B.V. Krutasov, N.V. Karmanovskaya // Multidisciplinary Modeling in Materials and Structures. 2021. Vol. 17. No. 4. pp. 739-746.

5. Sobolevsky M.V., Motsarev G.V., Rozenberg V.R. Carbofunctional organosilanes and organosiloxanes. M.: Chemistry, 1990. 236 p.

6. Internet resources. URL: <http://www.termo-wood.ru/>, <http://www.woodtrade.ru/>, <http://www.bestreferat.ru/>, <http://forums.wood.ru/>, <http://www.reznoe.ru/>

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 78–88.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):78–88.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья

УДК 551.34

doi: 10.52978/25421220_2022_12_78–88

**СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ
ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Анатолий Викторович Брушков¹, Дмитрий Степанович Дроздов²,
Владимир Александрович Дубровин³, Михаил Николаевич Железняк⁴,
Алексей Борисович Осокин⁵, Марат Ринатович Садуртдинов⁶,
Дмитрий Олегович Сергеев⁷, Галина Владимировна Малкова⁸

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

^{2,6,8}Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия.

³Гидроспецгеология, г. Москва, Россия.

⁴Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия.

⁵Газпром добыча Надым, г. Надым, Россия.

⁷Институт геоэкологии РАН, г. Москва, Россия.

Аннотация. Из-за возможной в ближайшем будущем деградации вечной мерзлоты государственная система ее мониторинга является крайней необходимостью. Предложена структура и определяемые параметры мониторинга мерзлоты на основе данных, накопленных в научных и производственных организациях.

Ключевые слова: вечная мерзлота, фоновый мониторинг, геотехнический мониторинг, геокриологический стационар.

Для цитирования: Структура и параметры геокриологического мониторинга / А.В. Брушков, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк и [др.]. // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 78–88. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_2022_12_78–88.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**STRUCTURE AND PARAMETERS
GEOCRYOLOGICAL MONITORING**

Anatoly V. Brushkov¹, Dmitry S. Drozdov², Vladimir A. Dubrovin³,
Mikhail N. Zheleznyak⁴, Alexey B. Osokin⁵, Marat R. Sadurtdinov⁶,
Dmitry O. Sergeev⁷, Galina V. Malkova⁸

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

^{2,6,8}Institute of the Cryosphere of the Earth TYUMNTS SB RAS, Tyumen, Russia.

³Hydrospetsgeology, Moscow, Russia.

⁴P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia.

⁵Gazprom Dobycha Nadym LLC, Nadym, Russia.

⁷Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract. Due to the possible degradation of permafrost in the near future, the state system of its monitoring is extremely necessary. The structure and defined parameters of permafrost monitoring based on data accumulated in scientific and industrial organizations are proposed.

Keywords: permafrost, background monitoring, geotechnical monitoring, geocryological hospital

For citation: Structure and parameters of geocryological monitoring / A.V. Brushkov, D.S. Drozdov, V.A. Dubrovin, M.N. Zheleznyak and [others]. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12):78–88. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_78-88.

1. Состояние проблемы. Из 35 млн. кв. км территории вечной мерзлоты (криолитозоны) на Земле 11 млн. кв. км приходится на Российскую Федерацию, что составляет около 65% площади страны (рис. 1). По условиям недропользования и в целом хозяйственного освоения территории вечной мерзлоты относятся к регионам со сложными и особо сложными геологическими и геоэкологическими условиями. Инженерно-геологическая, геокриологическая и гидрогеологическая изученность криолитозоны Арктики слабая, о состоянии криолитозоны на шельфе арктических морей имеются ограниченные сведения. Устойчивость криолитозоны к колебаниям климата или влиянию деятельности человека в процессе освоения зависит от температуры горных пород, от содержания и распределения в них подземного льда. Изменения теплового состояния вечной мерзлоты определяют развитие криогенных геологических процессов и явлений. Некоторые из них, такие как термоабразия, термоэрозия, наледи и оползни-сплывы, следует отнести к мощным рельефообразующим факторам, способным за короткое время изменить внешний облик ландшафтов. Другие процессы – пучение, термокарст, криогенное растрескивание – иногда менее заметно развиваются в естественной обстановке, но пораженность ими отдельных регионов достигает 30–50%.

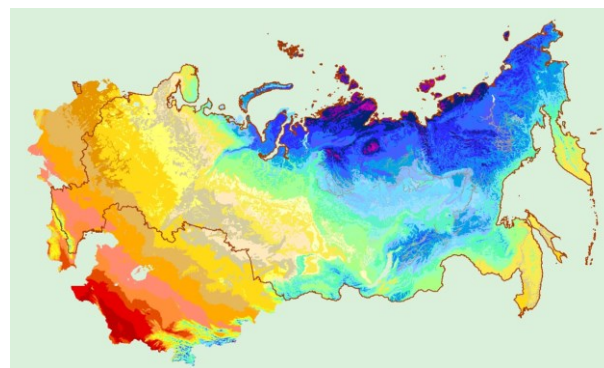


Рис. 1. Вечная мерзлота занимает около 65% территории РФ и выделяется по среднегодовым температурам горных пород, зеленый и синий цвета – ниже 0 °C (© кафедра геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова)

Актуальность геокриологического мониторинга определяется тем, что:

- геокриологическая, инженерно-геологическая и гидрогеологическая изученность криолитозоны, в том числе мониторинговыми наблюдениями, картированием осваиваемых регионов, полевыми и лабораторными исследованиями мерзлых грунтов не соответствует темпам освоения Арктики;
- изменения теплового состояния вечной мерзлоты под влиянием климатических вариаций происходят на протяжении многих лет, но не достигли своего максимума; это обстоятельство значительно повысило риски в строительстве и недропользовании, возросли эпидемиологические и экологические угрозы на осваиваемых территориях; циклическое похолодание может обусловить еще большие угрозы техногенных катастроф из-за промерзания таликов;
- возросшие техногенные нагрузки и нарушения условий эксплуатации при-

вели к значительному росту деформаций зданий и инженерных сооружений в Арктике, доля деформированных объектов достигает 40% и более; отмечается потеря несущей способности оснований даже недавно построенных зданий и сооружений, деформации автомобильных и железных дорог;

- отмечается значительное снижение объёма работ мерзлотной направленности в системе Минприроды России, большинство данных о состоянии криолитозоны устарело и нуждаются в обновлении и актуализации; Минстрой и ЖКХ РФ, Минтранс и другие не имеют целевых программ изучения опыта строительства и эксплуатации градостроительных агломераций и транспортных коммуникаций в Арктике, систематический мониторинг строительных объектов в Арктике не ведется;

- средний расчетный срок службы многих городских, муниципальных зданий и промышленных сооружений в Арктике без реконструкции и капитального ремонта превышен;

- отсутствуют координация и регулирование работ недропользователей, (градостроительных агломераций, промышленных предприятий и других собственников) по ведению геотехнического мониторинга (ГТМ);

- научно-исследовательские работы РАН и вузов способны определить лишь самые общие закономерности развития вечной мерзлоты, их экспериментальный потенциал ограничен, целевое финансирование на мониторинг отсутствует;

- отсутствует межведомственный обмен информацией, массивы данных инженерных изысканий, фонового мониторинга и ГТМ не доступны для экспертного, научного сообщества, предприятий и власти регионов.

Особенностью современных изменений глобального климата является потепление конца XX–начала XXI вв., отмеченное со второй половины 1970-х гг. Согласно данным Рабочей группы

по объединенным моделям (WGCM) Всемирной Программы исследования климата (WCRP), средняя скорость потепления для земного шара составляет 0,166 °C/10 лет за 1976–2019 гг. и 0,075 °C/10 лет за 1901–2019 гг. Согласно большинству оценок, наиболее значительные изменения климата происходят в области высоких широт Северного полушария.

Важным индикатором климатических изменений, в значительной степени определяющим состояние криолитозоны, является изменение режима и количества атмосферных осадков, особенно в зимний период. Увеличение мощности снежного покрова обуславливает дополнительное отепляющее влияние на многолетнемерзлые породы (ММП), превышающее воздействие летних климатических факторов. При этом на значительной части Арктики установлена тенденция к уменьшению продолжительности залегания снежного покрова со средним трендом 2,03 дней/10 лет. Повышение температуры воздуха и увеличение количества летних осадков влечет за собой изменение условий теплообмена на поверхности за счет изменения видового состава напочвенных растительных покровов, кустарничков и появления в южных окраинах тундр древесной растительности. Напочвенные покровы играют важную роль в формировании температурного режима ММП, преимущественно охлаждая вечную мерзлоту, но иногда оказывающим и отепляющее влияние.

Изменения климата приводят к нарушению температурного режима верхних горизонтов ММП во всех регионах криолитозоны России. Связь температуры воздуха и температуры горных пород не является прямой, но потепление климата ведет, как правило, к повышению температуры горных пород. Температурный режим горных пород определяет физико-механические свойства ММП и развитие криогенных инженерно-геологических процессов, в том

числе опасных. Температурный режим верхних горизонтов криолитозоны определяется структурой радиационно-теплогового баланса поверхности, тепловым влиянием наземных покровов (снег, растительность, поверхностные воды), теплопотоком из недр Земли, а также процессами тепломассопереноса в массиве пород. Основные параметры, характеризующие температурный режим пород – среднегодовая температура пород сезонно-талого слоя (СТС), среднегодовая температура ММП, амплитуда колебания температуры на различных глубинах в течение годового цикла, глубина проникновения колебаний в мерзлый массив (так называемая глубина нулевых годовых амплитуд).

Результаты длительных наблюдений за температурами вечной мерзлоты в различных районах мира показывают, что наблюдается их постепенный рост (рис. 2).

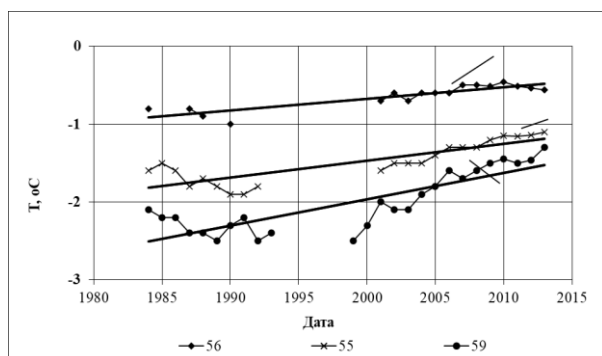


Рис. 2. Изменчивость среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в различных ландшафтных условиях на стационаре Болванский (Север Европейской части РФ): скв. 59 – типичная тундра; скв. 55 – деградирующий полигональный торфяник; скв. 51 – дренированная тундра

Южная граница распространения островной мерзлоты за период потепления в Европейской части Арктики сместилась к северу на 30–40 км в Печорской низменности и до 80 км – на равнинах Приуралья.

Так, в северной тайге Западной Сибири и лесотундре на широте 65–66° на территории ЯНАО среднегодовые температуры пород здесь повысились в среднем на 1–2 °C и во всех точках наблюдений стали близки к 0 °C. За тот же период

на обширных водоразделах в лесотундровых ландшафтах Западной Сибири с прерывистым распространением мерзлоты в полосе шириной около 100 км кровля ММП протаяла до глубины 3–8 м от дневной поверхности.

Во многих районах Средней и Восточной Сибири наблюдается рост температур грунтов (рис. 3).

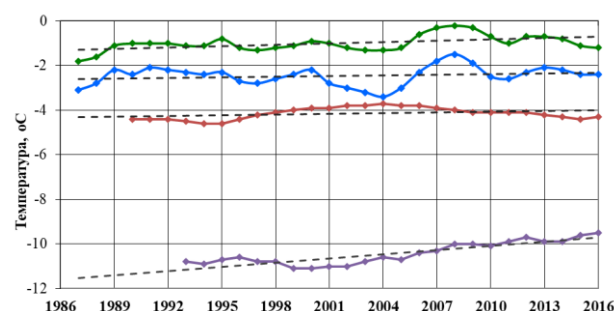


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м в различных районах и ландшафтах Восточной Сибири: 1 – Ц. Якутия (песчано-грядовый); 2 – Ц. Якутия (межгрядово-низиный); 3 – Анадырь (типичная тундра); 4 – Тикси (типичная тундра)

Тренд наибольшего повышения температуры мерзлых толщ за период наблюдений с 1985 г. отмечен в западной части Восточной Сибири – 0,44 °C/10 лет. В центральном секторе этого региона он составил 0,31 °C/10 лет. Наименьший тренд повышения температуры ММП зафиксирован в Чукотском секторе арктической зоны – 0,20 °C/10 лет.

2. Опыт фонового и геотехнического мониторинга криолитозоны. Методологической основой разработки системы геокриологического мониторинга являются представления о криолитозоне как части геологической среды с особыми свойствами. Под влиянием природных процессов, меняющегося климата, а также при техногенных воздействиях могут происходить негативные изменения в геосистемах криолитозоны. Предупреждение таких явлений возможно при учете закономерностей природных процессов, а также на основе разработки системы сбалансированного развития территорий. Необходимая для решения

этих задач информация может быть получена на основе геокриологического мониторинга.

В настоящее время наблюдения за фоновым состоянием криолитозоны выполняются по международной программе в рамках Сети глобального мониторинга криолитозоны (GTN-P – Global terrestrial Network on Permafrost). Сеть была создана в начале 1990-х гг. Международной ассоциацией мерзлотоведения (IPA – International Permafrost Association) в рамках Глобальной системы наземных наблюдений (GTOS – Global Terrestrial Observing Network) и Всемирной системы наблюдений за климатом (GCOS – Climate observing System). Всемирная система наблюдений за климатом и Глобальная система наземных наблюдений включает более 50 регистрируемых параметров состояния и динамики компонентов природной среды, в том числе и многолетнемерзлых пород. Операторами сети являются геологические службы или университеты. Наблюдения ведутся в десятках скважин в Канаде (Геологическая служба), на Аляске (Геологическая служба США и университет Аляски), Норвегии (университеты и научные институты), Швейцарии (университет) и других странах. Разветвлённая сеть в сотни скважин с единым аналитическим центром под руководством Академии Наук создана КНР в Тибете. При этом проводится как фоновый мониторинг, так и геотехнический мониторинг (ГТМ) инженерных объектов. Последний в ограниченном объеме проводят производственные предприятия и научные учреждения.

В настоящее время в системе ФА РОСНЕДРА (Минприрода) функционируют лишь два объекта, осуществляющих мониторинговые наблюдения в криолитозоне. Это Воркутинский опорный мерзлотно-гидрогеологический полигон, в пределах которого ведется государственный мониторинг состояния

недр (ГМСН) по Северо-Западному Федеральному округу и геокриологический стационар Марре-Сале, выполняющий функции опорного информационного объекта мониторинга криолитозоны в Уральском Федеральном округе. Институты РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова на Европейском Севере располагают стационарами и площадками периодического обследования: площадка «Болванский», «Шапкино», «Кашин», Учебно-научная площадка в Воркуте и на побережье Байдарацкой губы, «Тарко-Сале», «Надымская» и другие. ИМЗ СО РАН совместно с рядом научных организаций проводят мониторинговые исследования в окрестностях пос. Тикси, в дельте р. Лены и на ряде площадок в Центральной Якутии и других районах.

Из сфер деятельности промышленного техногенеза, включая транспортное строительство, гидросооружения, городские и муниципальные сооружения, наиболее полно геотехнический мониторинг представлен на объектах газовой промышленности (в сфере компетенций ООО «Газпром добыча Надым»), а также Транснефти. Количество наблюдательных скважин в целом составляет несколько тысяч. При этом число деформированных зданий и сооружений в криолитозоне велико и достигает около 40%.

Система геотехнического мониторинга (ГТМ) включает элементы, позволяющие инструментальными (в том числе дистанционными) методами осуществлять контроль за параметрами геотехнических систем (ГТС) (глубина сезонного промерзания и оттаивания грунтов, температурный режим грунтов, уровень грунтовых вод, деформации поверхности, деформации фундаментов, элементов конструкций зданий и инженерных сооружений). Конкретный состав работ по ГТМ, методы и методики мониторинга, применяемые приборы и оборудование, а также периодичность проведения наблюдений различны для разных типов объектов, стадий их жиз-

ненного цикла, инженерно-геокриологических условий их размещения и определяются программой ГТМ. Итоговым информационным документом, характеризующим состояние инженерного объекта и аккумулирующим геотехническую информацию об объекте на различных этапах его жизненного цикла, является геотехнический паспорт объекта, который является открытым документом, и содержащаяся в нем информация пополняется по мере проведения работ в рамках ГТМ. Основой эффективного контроля и управления состоянием ГТС на объектах ПАО «Газпром» является информационно-аналитическая система (ИАС) ГТМ, включающая в себя программно-аппаратную и информационную базу.

ИАС ГТМ предназначена для накопления, хранения и обработки данных мониторинга; прогнозного моделирования состояния элементов ГТС; анализа и оценки безопасности эксплуатации сооружений и экологической сохранности территорий; плановой, оперативной и экстренной передачи информации. ИАС обеспечивает вертикальные и горизонтальные связи между различными управленческими уровнями системы ГТМ посредством организации информационных потоков. В целом на объектах нефтегазовой промышленности реализована в определенной мере эффективная система ГТМ, позволяющая снизить риски, связанные с взаимодействием инженерных объектов и ММП.

Однако в системе ГТМ отсутствуют фоновые наблюдения за изменением теплового состояния мерзлых толщ под влиянием климата. Это снижает эффективность мониторинга и использования его результатов в качестве основы при проектировании новых объектов, при разработке проектов капитальных ремонтов и реконструкции эксплуатирующихся объектов. Координации и обмена информацией с фоновыми региональными стационарами нет.

Отсутствует межведомственный обмен информацией, получаемой в рамках ГТМ и имеющей общегосударственное, стратегическое значение.

3. Цель, задачи и структура государственного мониторинга вечной мерзлоты. Государственный мониторинг вечной мерзлоты (далее мониторинг криолитозоны) представляет собой межведомственную систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния вечной мерзлоты Арктики в естественных условиях (фоновый мониторинг, или ФМ) и на освоенной территории (геотехнический мониторинг, или ГТМ), составления прогнозов ее изменений под влиянием естественных природных факторов, недропользования, промышленного, гражданского строительства и жилищно-коммунального хозяйства и разработки методов регулирования состояния вечной мерзлоты для охраны и рационального использования криогенных ресурсов и устойчивого развития.

Мониторинг криолитозоны является составной частью (подсистемой) комплексной системы мониторинга окружающей природной среды.

Целью государственного мониторинга криолитозоны является:

- обеспечение экологически безопасного функционирования объектов недропользования, промышленного, гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны, шельф северных морей;
- доизучение и картографирование инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий территорий как не соответствующих современному уровню;
- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике;

- информационное обеспечение государственных структур власти, органов местного самоуправления и граждан информацией о состоянии вечной мерзлоты.

Основными задачами мониторинга криолитозоны являются:

- получение, сбор, обработка и анализ данных о состоянии криолитозоны;
- оценка состояния криолитозоны и прогнозирование его изменений;
- выявление и прогнозирование развития природных и техногенных процессов, влияющих на состояние криолитозоны;
- разработка эффективных мероприятий по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геологических процессов на осваиваемой территории;
- регулярное информирование органов государственной власти, организаций, субъектов хозяйственной деятельности и граждан об изменениях состояния криолитозоны в установленном порядке;
- межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество в сфере обмена информацией по экологически безопасному природопользованию в Арктике.

Структура государственного мониторинга включает три основных блока

1. Блок сбора исходной информации.
2. Блок обработки информации, решения комплекса прогнозных задач и подготовки информации для принятия управляющих решений.
3. Блок принятия решений по контролю и регулированию состояния вечной мерзлоты на народнохозяйственных объектах.

Блок сбора исходной информации включает в себя:

- фоновый мониторинг на геокриологических стационарах и полигонах, включая мелководную зону шельфа северных морей;

- комплексную геокриологическую съемку масштаба 1:500 000 на территории геокриологических полигонов;

- геотехнический мониторинг на объектах недропользования, промышленного и гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем;

- научное сопровождение изыскательских и проектных работ;

- мерзлотные станции в городах и муниципальных образованиях;

- мерзлотные инспекции в регионах;

- региональные центры проектирования и реконструкции зданий и сооружений;

- контрольные наблюдения и научное сопровождение полупромышленных экспериментов.

Блок обработки геокриологической информации включает в себя:

- базы региональных данных мониторинговой и региональной геологической информации в региональных аналитических центрах, в том числе:

- региональные климатические данные;

- результаты фоновой геокриологической мониторинга и региональных съемок;

- результаты геотехнического мониторинга на объектах недропользования, промышленного и гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем, региональных космических снимков и видеосъемок с применением БПЛА;

- материалы полупромышленных экспериментов;

- отечественные и мировые справочные данные;

- решение прогнозных и критериальных задач по оценке устойчивости региональных природных систем для определения предельно-допустимых техногенных нагрузок;

- Центральный банк региональных баз данных в головном аналитическом центре, выполняющем:

- оценки макромасштабных изменений и устойчивости геоэкологической об-

становки в различных регионах и выявление прогнозных критических ситуаций в Арктической зоне РФ в целом;

- утверждение и изменения предельно-допустимых нагрузок;

- разработку и составление карт политики земле- и недропользования;

- разработку проектов комплексного использования и рекультивации территорий;

- апробации новых проектных решений и реализация проектов;

- проведение экспертизы крупных национальных проектов освоения Арктической зоны РФ;

- сопряжение деятельности с надзорными органами (федеральными и региональными отделениями Ростехнадзор, Росприроднадзор, авторского надзора проектных организаций);

- подготовку материалов для принятия управляющих решений;

- разработку предложений, методов и технологий по гарантированному преодолению критических ситуаций.

Блок принятия решений осуществляет:

- детальный анализ материалов, поступивших на рассмотрение;

- проведение ускоренной экспертизы независимыми профильными экспертами с выездом комиссии на объекты с прогнозируемой нештатной ситуацией;

- подготовку соответствующих приказов и распоряжений Правительства РФ о приостановке производственно-хозяйственной деятельности на объектах, представляющих, согласно прогнозным оценкам по данным государственного мониторинга криолитозоны и независимых экспертиз, реальную угрозу экологической обстановке в регионе;

- утверждение порядка выхода из сложившейся критической ситуации.

4. Организация государственного мониторинга вечной мерзлоты. Представляется необходимым создание государственной структуры (Федерального агентства) изучения и прогнозирования

состояния вечной мерзлоты на основе системы государственного мониторинга вечной мерзлоты. Региональные Центры по изучению, мониторингу и прогнозу состояния вечной мерзлоты осуществляют:

- взаимодействие с объектами хозяйствования для организации мерзлотных и сопутствующих наблюдений на их объектах;

- сбор, накопление, хранение, обработку, анализ данных о природных и техногенных характеристиках вечной мерзлоты и объектах хозяйствования в криолитозоне;

- геокриологический прогноз (совместно с Федеральным центром) для населённых пунктов, земельных отводов, предприятий.

Геокриологические фоновые полигоны на территории АЗРФ – высшее звено государственного мониторинга вечной мерзлоты – площадь в пределах топографического листа м-ба 1:500 000. Полигон закладывается в характерных природно-климатических и ландшафтно-геоморфологических условиях и привязывается к узлам хозяйствования крупных земле- и /или недропользователей. При этом выполняется кондиционное, с использованием ДЗЗ, инженерно-геологическое (геокриологическое) картирование, обустривается 10–15 геокриологических скважин глубиной 100 м и 1–2 на всю мерзлую толщу. Полигон объединяет в себе 1–2 фоновых геокриологических стационаров и наблюдательные объекты геотехнического мониторинга (недропользования, промышленных сооружений, транспортных систем, городских и муниципальных образований).

Фоновый геокриологический стационар (площадь 10–25 км², 1–2 шт. на полигоне) размещается в характерных ландшафтных и мерзлотных условиях. Он насчитывает 25–30 геокриологических скважин глубиной 30 м, 40 м, 80 м, 100 м, 250–300 м. На нем проводятся мо-

ниторинговые ландшафтные, снегомерные и геофизические работы, фиксируются процессы и их динамика. В системе государственного мониторинга криолитозоны геокриологические стационары занимают особое место, поскольку здесь работы и исследования могут осуществляться как в круглогодичном режиме, так в режиме экспедиционных посещений. Исходя из опыта и задач по организации системы мониторинга, следует, что в основу создания инфраструктуры стационара должны быть положены принципы безопасного и комфортного жизнеобеспечения небольших коллективов исследователей в отдаленных и безлюдных территориях Арктики длительное время в суровых климатических условиях в любой период года или круглогодично. Примером функциональной застройки фонового геокриологического стационара может служить хозяйственная и жилищная инфраструктура полярных гидрометеорологических станций второго разряда, построенных или реконструированных в последнее десятилетие.

Строительство наблюдательных выработок на геокриологических стационарах на Европейском Севере и в Западной Сибири включают проходку скважин (укороченными рейсами с полным отбором керна с продувкой до 70 м далее с промывкой) глубиной 250 м – 1 скв. (на всю мощность ММП), 100 м – 4 скв.; 80 м – 4 скв.; 40 м – 6 скв.; 30 м – 10 скв. В Восточной Сибири и на Чукотке, где мощность мерзлоты больше, глубина опорной скважины на всю мощность ММП составит ориентировочно 600 м, в остальном объеме бурения в секторах размещения стационаров совпадает. На геокриологическом полигоне, в отличие от стационаров, из объектов капитального строительства находятся лишь опорные инженерно-геокриологические и гидрогеологические скважины.

В городах и муниципальных образованиях создание мониторинговой сети предполагает строительство опорных

наблюдательных термометрических скважин глубиной: 300 м – 1–2 скв.; 100 м – 4 скв.; 80 м – 4 скв.; 40 м – 6 скв.; и инженерно-геологических выработок глубиной до 15 м – 100 скв. для обследования состояния оснований фундаментов зданий и сооружений.

По материалам бурения (монолитам кернов) на геокриологических стационарах, полигонах и мерзлотных станциях предполагается выполнить комплекс определений физических, физико-механических свойств мерзлого грунта с определением прочности и деформируемости длительным испытанием на одноосное сжатие на монолитах. Определить теплофизические свойства рыхлых и скальных грунтов в мерзлом и талом состоянии. Для сохранения грунтовых монолитов в мерзлом состоянии предусматриваются затраты на их транспортировку в Региональные аналитические центры с места полевых работ (полигонов) вертолетным транспортом (на расстояние около 350–400 км).

По завершении бурения скважин планируется выполнение комплекса геофизических (сейсмо-электроразведочных) работ, каротажных и по буровым профилям, позволяющих повысить достоверность геокриологических разрезов. Наблюдательные скважины оборудуются автономными автоматизированными термоизмерительными приборами для регистрации, накопления и передачи мониторинговой информации по различным (бесконтактным) каналам связи, оптимальным по затратам в конкретных регионах, в центр сбора или операторам на мобильных средствах передвижения.

Необходимо подчеркнуть, что определением температуры грунтов и деформаций инженерных сооружений параметры, которые необходимо отслеживать при проведении мониторинга, далеко не исчерпываются. Важно не столько современное состояние вечной мерзлоты, сколько ее прогноз. Для выполнения

геокриологического прогноза необходимы теплофизические характеристики снежного и растительного покровов, грунтов, тепловые потоки и другие параметры, которые подвержены естественной и техногенной динамике.

В соответствии с обоснованием размещения наблюдательных объектов на территории АЗРФ предлагается создание 15 геокриологических стационаров: Печорский, Воркутинский, Марресальский, Сабетта, Гыданский, Уренгойский, Ванкурский, Норильский (Снежногорский), Хатангский, Саскылакский (Тиксинский), Депутатский, Жиганский, Черский, Магаданский, Анадырский. Стационары могут включать в себя 1, 2 и в некоторых случаях и больше геокриологических полигонов.

Целесообразно создание шести мерзлотных станций, которые предположительно будут расположены в следующих городах Арктической зоны: Архангельск (Сыктывкар), Воркута, Салехард, Норильск, Якутск, Магадан (Анадырь). В этих же городах следует сформировать мерзлотные инспекции с правами котлонадзора для осуществления регулярного контроля за соблюдением правил эксплуатации зданий и сооружений, построенных по первому принципу строительства на вечномерзлых грунтах.

Выводы:

1. Современные тенденции состояния многолетнемерзлых пород (ММП) во многом определяются глобальными климатическими изменениями. Фоновые изменения температуры мерзлых толщ обусловили неустойчивое тепловое состояние островной мерзлоты в зоне южной тундры Европейской территории России. Среднегодовая температура ММП на глубине 7–10 м за весь период наблюдений повысилась местами более чем на 1,5 °C. В Восточной Сибири среднегодовая температура ММП в Арктической зоне за период наблюдений повысилась на глубине 10 м в среднем на 1,5–1,9 °C. Техногенез дополняет воздей-

ствие фоновых климатических изменений. Результат их совместного влияния обуславливает в ряде регионов потерю устойчивости мерзлых оснований, приводит к крупным авариям природно-технических систем, экологическим катастрофам и в целом к возрастанию риска природопользования в осваиваемых районах криолитозоны.

2. Система фоновых геокриологических наблюдений представлена в различных министерствах и ведомствах, причастных к изучению Арктики, ограниченным числом геокриологических стационаров и многочисленными площадками периодического посещения. Так, в системе Минприроды РФ функционирует всего два объекта мониторинговых наблюдений в Арктике. В системе Российской Академии наук на Европейском Севере, в Западной и Восточной Сибири и на Чукотке насчитывается около 20 специализированных площадок, преимущественно со скважинами недостаточной глубины, оборудованных измерительной аппаратурой, не отвечающей современным требованиям.

3. На объектах техногенеза повышение среднегодовой температуры воздуха и увеличение зимних осадков за последние четверть века привело к значительным изменениям температурного режима ММП. Несмотря на то что на многих объектах отрасли создана и функционирует система ГТМ и уровень аварийности промышленных объектов и транспортных коммуникаций снизился, он не достигает необходимых показателей. Главным недостатком существующей системы ГТМ на объектах нефтегазовой отрасли является отсутствие в составе режимной сети ГТМ фоновых площадок для контроля температурного режима ММП, динамики развития экзогенных процессов, гидрологического и гидрогеологического режимов территории, состояния напочвенных покровов и др. важных показателей состояния геосистем криолитозоны в природных, ненарушен-

ных условиях. Это резко снижает эффективность выполняемых в рамках ГТМ работ.

4. Формирование пространственно-распределенной наблюдательной сети мониторинга криолитозоны на основе создания системы геокриологических полигонов, учитывающих развитие «опорных зон экономического развития», климатические регионы и районирования криолитозоны, во взаимосвязи с результатами наблюдений геотехнического мониторинга, будет иметь важное значение и обогатит современную региональную фактологическую базу данных геокриологических исследований. Для

осуществления координации работы гео-криологических стационаров и полигонов, мерзлотных станций и мерзлотных инспекций в упомянутых выше городах предлагается создание Региональных аналитических центров. Система государственного мониторинга вечной мерзлоты сможет существенно снизить, а в ряде случаев исключить риски освоения криолитозоны Арктики в границах средне-и долгосрочной перспективы.

Настоящая работа может рассматриваться как первый шаг в создании полноценной системы государственного мониторинга вечной мерзлоты для территории Российской Федерации.

Список источников

1. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Бадина, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, С.Н. Окунев, Н.А. Остарков, А.Б. Осокин, Р.Ю. Федоров // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. №6. С. 3–15.

2. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / V.P. Melnikov, V.I. Osipov, A.V. Brouchkov, A.A. Falaleeva, S.V. Badina, M.N. Zheleznyak, M.R. Sadurtdinov, N.A. Ostarkov, D.S. Drozdov, A.B. Osokin, D.O. Sergeev, V.A. Dubrovin, R.Yu. Fedorov // Natural Hazards, 2022, Springer Verlag (Germany).

References

1. Adaptation of the Arctic and Subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen grants / V.P. Melnikov, V.I. Osipov A.V. Brushkov, S.V. Badina, D.S. Drozdov, V.A. Dubrovin, M.N. Zheleznyak, M.R. Sadurtdinov, D.O. Sergeev S.N. Okunev, N.A. Ostarkov, A.B. Osokin, R.Y. Fedorov. *The cryosphere of the Earth*. 2021;(6);25:3–15.

2. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / V.P. Melnikov, V.I. Osipov, A.V. Brouchkov, A.A. Falaleeva, S.V. Badina, M.N. Zheleznyak, M.R. Sadurtdinov, N.A. Ostarkov, D.S. Drozdov, A.B. Osokin, D.O. Sergeev, V.A. Dubrovin, R.Yu. Fedorov // Natural Hazards, 2022, Springer Verlag (Germany).

Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 89–97.
Scientific bulletin of the Arctic. 2022;(12):89–97.

**Опыт и перспективы строительства, эксплуатации зданий
и сооружений на вечномёрзлых грунтах**

Научная статья
УДК 624.15:(528.482:551.34)
doi: 10.52978/25421220_2022_12_89–97

**УСТРАНЕНИЕ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ОСАДОЧНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
РАСТЕПЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Игорь Яковлевич Харченко

Высшая школа экономики, Институт строительства и жилищно-коммунального
хозяйства ГАСИС, г. Москва, Россия.

Аннотация. В работе представлен анализ факторов, определяющих условия применения технологии компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений от сверхнормативных деформаций в условиях растепления многолетнемерзлых грунтов. С учётом конструктивных решений фундаментов зданий, геологических и гидрогеологических условий изложены технологические основы устранения проявившихся сверхнормативных осадочных деформаций и сооружений по технологии компенсационного нагнетания.

Ключевые слова: грунт, осадочные деформации, растепление, метод компенсационного нагнетания.

Для цитирования: Харченко И.Я. Устранение сверхнормативных осадочных деформаций зданий и сооружений в условиях растепления многолетнемерзлых грунтов // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 89–97. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_89–97.

**Experience and prospects of construction, operation of buildings
and structures on permafrost soils**

Original article

**ELIMINATION OF EXCESS SEDIMENTARY
DEFORMATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES
IN CONDITIONS OF THAWING OF PERMAFROST SOILS**

Igor Yakovlevich Kharchenko

Higher School of Economics, Institute of Construction and Housing and Communal
Services GASIS, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of the factors determining the conditions for the use of compensatory injection technology to protect buildings and structures from excessive deformations in conditions of thawing of permafrost soils. Taking into account

the structural solutions of the foundations of buildings, geological and hydrogeological conditions, the technological foundations of the elimination of the manifested excess sedimentary deformations and structures using the technology of compensatory injection are described.

Keywords: soil, sedimentary deformations, splitting, compensatory injection method.

For citation: Kharchenko I.Ya. Elimination of excess sedimentary deformations of buildings and structures in conditions of thawing of permafrost soils. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022;(12): 88–97. http://dx.doi.org/10.52978/25421220_022_12_88-97.

Введение. В последние десятилетия обострилась проблема, связанная с устранением осадочных деформаций зданий и сооружений различного назначения вследствие растепления многолетнемерзлых грунтов.

Во многих случаях растепление мёрзлых грунтов оказывает значительное негативное влияние на окружающую застройку, сопровождается развитием сверхнормативных деформаций, а часто разрушением зданий и сооружений, что связано со значительными финансовыми издержками. В связи с этим возникает необходимость проведения специальных защитных мероприятий, устраняющих последствия развития осадочных деформаций на существующие здания и сооружения. Исходя из анализа международного и отечественного опыта, одним из наиболее эффективных защитных мероприятий является реализация метода компенсационного нагнетания.

Технологические основы применения метода компенсационного нагнетания. Опыт применения метода компенсационного нагнетания в России подтвердил его эффективность в сравнении с другими геотехническими мероприятиями для превентивной защиты сооружений от сверхнормативных осадочных деформаций, и как безальтернативное решение – при необходимости выравнивания сооружений в проектное положение.

Отличие предлагаемого **метода управляемого компенсационного нагнетания** от классического метода заключается в том, что компенсация дефицита

грунта в основании существующих зданий и сооружений, сформировавшегося в результате земляных работ, суффозионных процессов и т.п., выполняется практически в любых нескальных грунтах путём нагнетания специальных инъекционных смесей, в установленном порядке и в соответствии с **обоснованным расчетом** технологическим регламентом.

Инъекционные растворы на минеральной основе должны иметь заданную вязкость, пенетрационную способность, высокую седиментационную устойчивость и управляемую кинетику затвердевания. Это позволяет сформировать расчётное напряженно-деформируемое состояние массива грунта, обеспечивающее управляемый подъём надземного сооружения, по принципу использования эффекта гидродомкрата, размещённого под всей площадью объекта.

В зависимости от реальных геотехнических условий, с целью исключения эффекта неуправляемого гидроразрыва в процессе инъекционного нагнетания, необходимо применять специальные смеси на минеральной основе с регулируемой вязкостью и кинетикой затвердевания. Так, например, в несвязных грунтах с высокой степенью проницаемости применяют низконапорное фильтрационное нагнетание, когда в грунт нагнетается высокоподвижная смесь, которая после заполнения открытых пор и капилляров в структуре грунта интенсивно загустевает, формируя вмещающий массив грунта и исключая развитие

неуправляемого гидроразрыва на стадии подъёма. При этом возможно многократное повторное выполнение инъекций с технологическими перерывами между ними, необходимыми для затвердевания раствора после инъектирования во вмещающий массив на предыдущей стадии.

Как показала практика геотехнического строительства в России [7–12], важным преимуществом данной технологии компенсационного нагнетания, по сравнению с другими методами защиты сооружений, является возможность прогнозирования с высокой степенью достоверности процессов развития вероятных деформаций и технологических параметров нагнетания как аналитическими, так и численными методами расчетов практически для всех видов грунтов.

Выполнению буроинъекционных работ предшествует комплекс подготовительных мероприятий, предусматривающий тщательное обследование состояния основных несущих конструкций зданий и сооружений, нуждающихся в защите развития возможных деформаций или подъёме, выполнение инженерно-геологических и геофизических исследований оснований фундамента с определением фактических физико-механических характеристик грунта. На этой основе выполняется разработка математической модели, адекватно описывающей формирование и развитие напряженно-деформируемого состояния (НДС) грунтового массива на всех этапах процесса компенсационного нагнетания, расчётное обоснование технологических параметров (количество инъекционной смеси, давление и интенсивность нагнетания, распределение инъекционной смеси по площади и высоте грунтового основания), а также прогноз развития перемещений основных строительных конструкций. При построении математических моделей учитываются особен-

ности конструктивных решений фундаментов: сплошная железобетонная плита, ленточные или свайные.

При этом с учётом взаимного размещения надземных и подземных сооружений, а также необходимости выполнения буроинъекционных работ в крайне стеснённых условиях плотной городской застройки, скважины часто устраиваются в подвальных помещениях или технологических подпольях. Это накладывает дополнительные трудности при реализации проектных решений.

На основании опыта применения метода компенсационного нагнетания установлено, что для надёжного управления процессом выравнивания или подъёма сооружений на проектную отметку в общем случае необходимо реализовать семь технологических переделов:

1) подготовительный, включающий обследование зданий, инженерно-геологические и лабораторно-экспериментальные исследования, математическое моделирование, проектирование, полевые испытания с целью оптимизации основных технологических параметров с учётом реальных геотехнических условий;

2) выполнение буроинъекционных работ с обустройством скважин и формированием системы управления подъёмом или защиты зданий от сверхнормативных деформаций;

3) «пассивная» фаза, выполняется с целью подготовки вмещающего массива с изотропными свойствами, для исключения неуправляемого гидроразрыва в период «активной» фазы компенсационного нагнетания;

4) «условно активная» фаза, соответствует нулевой фазе подъёма; на этом этапе обеспечивается формирование предварительно напряжённого состояния в грунтовом массиве для обеспечения первой реакции сооружения;

5) «активная» фаза, обеспечивает выравнивание или подъём сооружения на проектную отметку, либо сохранение сооружения в проектном положении;

6) фаза «компенсация» – следствие развития релаксационных процессов после завершения активной фазы нагнетания;

7) фаза «ликвидация», реализуется после полной компенсации возможных осадочных деформаций и проектной планово-высотной стабилизации сооружения.

В отдельных случаях, при прогнозируемых динамических или вибрационных воздействиях в период эксплуатации сооружений, и связанной с этим вероятности проявления осадочных деформаций является целесообразным не ликвидация, а временная консервация с заполнением тела скважин специальными закладочными смесями со слабой гидравлической активностью. Извлечение затвердевшей такой смеси из тела скважин осуществляется путём разбуривания с последующей промывкой.

Управление процессом компенсационного нагнетания выполняется в соответствии с программой, обеспечивающей согласованную работу насосного оборудования в соответствии с результатами непрерывного планово-высотного мониторинга сооружения. Это позволяет быстро реагировать на любые изменения состояния наблюдаемого здания и в соответствии с этим корректировать технологические параметры нагнетания.

Наиболее эффективным для мониторинга деформаций сооружения является использование автоматизированных систем на базе высокоточных электронных тахеометров и датчиков гидростатического нивелирования (ДГН) при том, что с помощью геодезических методов контролируются горизонтальные и вертикальные перемещения, а система ДГН позволяет в режиме онлайн отслеживать изменение высотного положения сооружения с повышенной точностью, по

сравнению, например, с тахеометром. Критерии оценки и их предельные значения (относительная разность осадок, максимальная осадка, крен, прогиб, раскрытие трещин или стыков) задаются в соответствии с категорией технического состояния сооружений и диктуются требованиями нормативной документации.

В процессе инъекционных работ ведется регистрация данных относительно каждой манжеты, а именно: дата инъекции, ее порядковый номер, объем, давление и расход. По результатам суммирования данных строятся изополя и трехмерная диаграмма, отображающие объемы инжектирования за выбранный промежуток времени и определяется коэффициент эффективности компенсационного нагнетания η , который на различных этапах может изменяться в диапазоне от 5 до 70%.

Управление характеристиками инъекционных растворов для подготовки вмещающего массива грунта. В связи с тем, что управление процессом компенсационного нагнетания возможно только в условиях, исключающих эффект гидроразрыва в процессе нагнетания, важным технологическим переделом является предварительная подготовка вмещающего массива грунта, с целью консолидации структуры несвязанного водонасыщенного грунта специальными инъекционными смесями. При этом инжектирование выполняется в режиме пропитки и характеризуется коэффициентом эффективности пенетрации (КЭП), который определяется величиной интенсивности нагнетания (л/мин.) при соответствующем давлении (бар). Для оценки влияния основных технологических параметров на величину коэффициента эффективности компенсационного нагнетания η был выполнен комплекс лабораторных исследований с применением математического метода планирования эксперимента. В качестве факторов влияния были приняты давление нагнетания (P , бар), интенсивность

нагнетания инъекционной смеси (V , л/мин.) и модуль крупности кварцевого песка (M_k). Уровни и интервалы варьирования, а также матрица планирования представлены в табл. 1. Исследования выполнялись на водонасыщенной модели грунта диаметром 100 мм и длиной 300 мм. Инъектирование выполнялось с использованием производственного насосного оборудования «DP 36–2–В» фирмы «Obermann GmbH». Инъекционная смесь приготавливалась с $B/T = 3,0$ в скоростном производственном смесителе в течение 5 мин.

Таблица 1

**3-факторная матрица планирования
(экспериментальные и расчетные данные)**

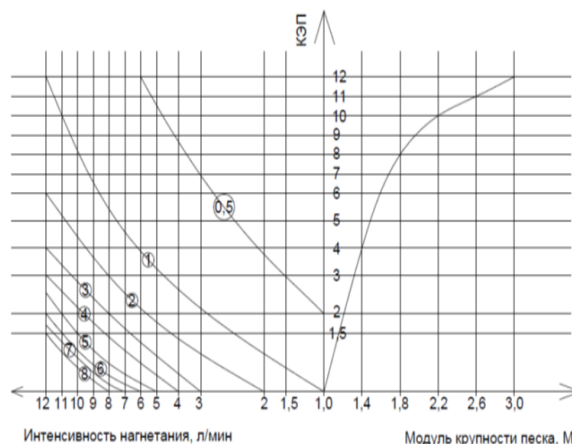
Условия планирования эксперимента					
Факторы		Уровни варьирования			Интервал
Натуральный вид	Кодовый вид	–1	0	1	
P , бар	X1	1,0	3,0	5,0	2,0
л/мин.	X2	1,0	5,0	9,0	4,0
M_k	X3	1,0	2,0	3,0	1,0

В результате вероятностно-статистической обработки экспериментальных данных была получена трехфакторная математическая модель зависимости КЭП от давления нагнетания, расхода пропиточного состава и модуля крупности песка, необходимые для оптимизации технологии нагнетания КН-1 с учетом конкретных геотехнических условий:

$$Y = 3,4 + 0,6X_1 + 0,9X_2 + 0,9X_3 + 0,9X_1^2 + 0,0X_2^2 + 0,2X_3^2 + 0,5X_1X_2 + 0,5X_1X_3 + (-0,1)X_2X_3.$$

На практике эту зависимость более удобно использовать в виде номограммы (рис. 1), которая позволяет по заданной величине КЭП определить параметры пропитки: давление (изолинии, бар), интенсивность нагнетания (л/мин.), в зависимости от вида грунта модуль крупности песка (M_k). Например, для крупных

песков с модулем крупности $M_k = 2,6$, величина КЭП = 7,8 при давлении нагнетания около 4 бар и интенсивности нагнетания 6 л/мин.



**Рис. 1. Номограмма для определения
основных параметров нагнетания
в различных песчаных грунтах**

На основе анализа результатов выполненных исследований можно сделать вывод о том, что прочностные и деформационные характеристики исходных образцов грунта существенно повышаются при пропитке специальной инъекционной смесью на минеральной основе (табл. 2).

Таблица 2

**Изменение свойств вмещающего грунта
после предварительной обработки
специальной инъекционной смесью
на минеральной основе**

Образец	Параметр	Исходный материал	Материал, пропитанный раствором	Увеличение параметра, %
Песок средней крупности	E , МПа	200	39,26	51,11
		400	46,59	55,97
		600	68,54	78,54
	φ , °		31,91	43,96
	$E_{K(0,1-0,2)}$, МПа		9,07	25,84
Песок мелкий	E , МПа	200	35,19	41,85
		400	44,97	59,04
		600	63,2	73,92
	φ , °		30,49	36,65
	$E_{K(0,1-0,2)}$, МПа		13,22	18,7

Исследования показали, что после обработки специальной инъекционной смесью модуль деформаций песков средней крупности увеличился на 14...30%, а мелких песков – на 16...19% и, соответственно, увеличились на 184,9 и 41,5% компрессионный модуль деформаций, а также на 36 и 20,5% угол внутреннего трения. Таким образом, предварительная обработка вмещающего массива грунта существенно снижает риск развития неуправляемого гидроразрыва, что является главной предпосылкой для повышения коэффициента эффективности компенсационного нагнетания η .

Анализ опыта практического применения технологии управляемого компенсационного нагнетания. Технология управляемого компенсационного нагнетания, начиная с 2013 г., успешно применялась для устранения деформаций эксплуатируемых зданий и сооружений, проявившихся при проходке перегонных тоннелей Московского метрополитена под комплексами различных зданий, обеспечив восстановление их первоначального положения.

Так, эту технологию было решено использовать после того, как при проходке тоннелей метрополитена в основании фундамента центрифуги (рис. 2) проявились осадки порядка 30 мм и, что более важно, появилась относительная разность осадок, которая для эксплуатации данного оборудования недопустима.

В соответствии с расчётным обоснованием были установлены порядок нагнетания по горизонтам и манжетам, а также основные технологические параметры компенсационного нагнетания (давление, количество, интенсивность нагнетания) (рис. 3).

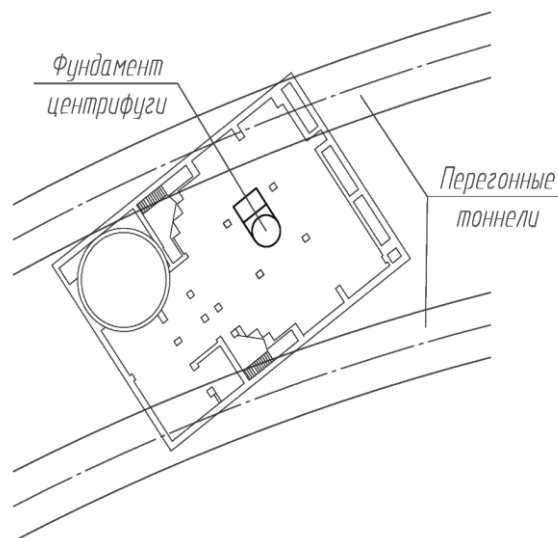


Рис. 2. Схема взаимного расположения перегонных тоннелей и здания центрифуги

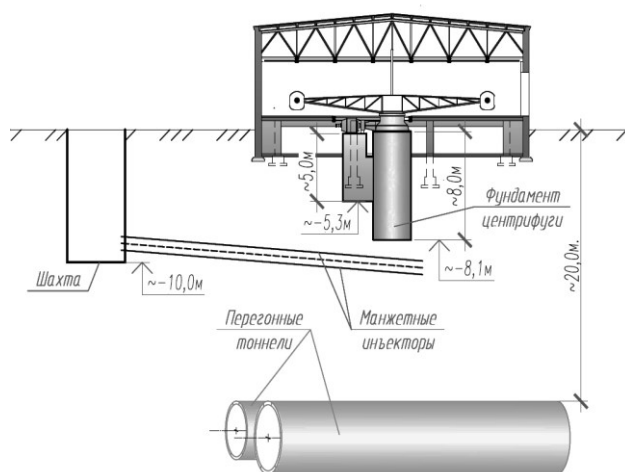


Рис. 3. Поперечный разрез по зданию центрифуги и котлована с установленными манжетными инъекторами

Принятые в проекте технологические решения были обоснованы результатами численного моделирования в пространственной постановке с использованием программно-вычислительного комплекса (ПВК) «Z_Soil» с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Исследование, проведенное на разработанной специально для данного случая математической модели, позволило учесть положение зон нагнетания, последовательность инъектирования и их объем, оценивая на всех этапах эффективность компенсационного нагнетания (рис. 4, 5).

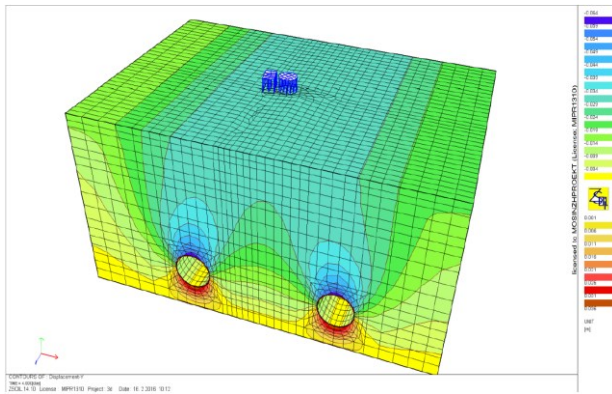


Рис. 4. Результаты расчета в ПКВ «Z_Soil»

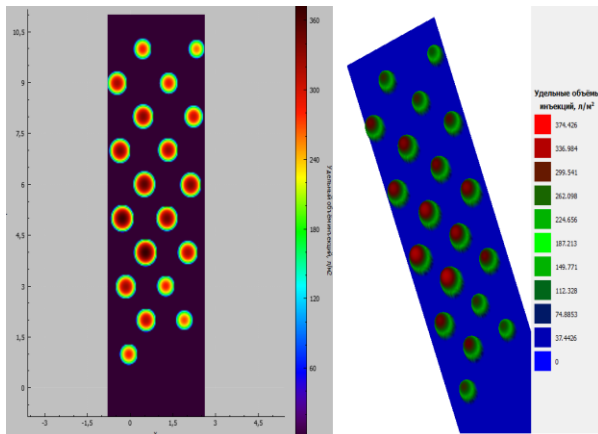


Рис. 5. Изополя удельных объемов нагнетания инъекционного раствора, выполненных за сутки

Управление процессом компенсационного нагнетания, включая корректировку его технологических параметров, выполнялось с помощью разработанного программного обеспечения, согласовывающего работу насосного оборудования с результатами непрерывного мониторинга планово-высотного положения фундамента.

Изменение высотного положения фундамента, помимо стандартных геодезических методов, фиксировалось в автоматизированном режиме с помощью датчиков гидростатического нивелирования (рис. 6), подключенных к сетевому программному комплексу «Monitron.kyuz». Данный комплекс обеспечивает (рис. 7) возможность удаленно контролировать и управлять работами по компенсационному нагнетанию с использованием сети Интернет в режиме реального времени, а также с заданной периодичностью или по запросу выдает информа-

цию в виде справок с графиками, таблицами и рекомендациями по параметрам нагнетания (рис. 7).



Рис. 6. Датчики гидростатического нивелирования, установленные на фундаменте центрифуги



Рис. 7. Отображение информации по высотному положению фундамента через сеть Интернет в программном комплексе «Monitron.kyuz»

По результатам работ удалось добиться относительной разности осадок центрифуги в пределах точности измерений 0,3 мм.

Технология компенсационного нагнетания успешно применяется в России с 2013 г.с целью исключения деформаций эксплуатируемых зданий и соору-

жений при проходке перегонных тоннелей, устройстве притоннельных сооружений и котлованов на строительстве станционных комплексов Московского метрополитена, для восстановления первоначального положения ряда других ответственных сооружений, получивших сверхнормативные деформации в процессе подземного строительства.

Выводы:

1. Защита зданий и сооружений от сверхнормативных осадочных деформаций, проявляющихся вследствие растепления многолетнемерзлых грунтов, эффективно обеспечивается технологией

компенсационного нагнетания с применением специальных инъекционных систем на минеральной основе.

2. Управление процессами компенсационного нагнетания обеспечивается применением разработанной методологии расчётного обоснования основных технологических параметров в сочетании с системой автоматизированного мониторинга, применением специальных инъекционных смесей на минеральной основе, а также насосного оборудования с одновременным регулированием расхода, давления и интенсивности нагнетания.

Список источников

1. Moseley M.P., Kirsch K., Falk Soil fracturing E. *Ground Improvement (Second Edition)*. 2004. P. 227.

2. Pleithner M. and Bernatzik W. / A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout. 1953.

3. Bezuijen A., F. van Tol. Compensation grouting in sand, fractures and compaction // *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Rotterdam, 2007. pp. 1257–1262.

4. Chambosse G., Otterbein R. State of the art of Compensation Grouting in Germany // *XVth International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Istanbul. 08.2002.

5. Gafar K., Soga, K., Bezuijen A., Sanders M.P.M. and Tol A.F. van. Fracturing of sand in compensation grouting. *Proc. 6st Int. Symposium on Geotech. Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Shanghai. 281–286.

6. Рашендорфер, Ю. Жуков В.Н., Майер К. Компенсационное нагнетание как способ обеспечения устойчивости зданий и сооружений при проходке тоннелей // *Метро и тоннели*. 2008. №4. С. 26–28.

7. Меркин В.Е., Валетт Ж.-Л. Решение проблемы минимизации осадок поверхности при щитовой проходке Лефортовского автотранспортного тоннеля в Москве. *Международная научно-практическая конференция «Городские подземные сооружения – опыт и возможности освоения подземного*

пространства на коммерческой основе». М., 2004. С. 45–48.

8. Смолдырев, А.Е. Технологическая схема компенсационного нагнетания твердеющих смесей в грунты при строительстве тоннеля в Лефортово // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2000. №1. С. 21–22.

9. Тер-Мартirosян З.Г., Абдулмалек Ала Саид. Напряженно-деформированное состояние преобразованного основания // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2007. №2. С. 8–11.

7. Чеботаев В.В. Расчеты деформации земной поверхности и оснований инженерных сооружений при строительстве тоннелей: дисс. ... кандидата техн. наук. М., 1970.

8. Чунюк Д.Ю., Иртуганова В.Р., Сафронова К.В. Влияние геотехнического барьера, устроенного методом компенсационного нагнетания, на деформацию существующего здания при строительстве туннеля // *Естественные и технические науки*. 2015. №4. С. 245–248.

9. СТО НОСТРОЙ 2.3.18–2011: Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. М., 2012. 63 с.

10. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. М., 2004. 168 с.

11. Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания / Е.Н. Беллендир,

А.В. Александров, М.Г. Зерцалов, А.Н. Симутин // Гидротехническое строительство. 2016. №2. С. 15–19.

12. Зерцалов, М.Г., А.Н. Симутин, А.В. Александров. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2015. №6. С. 32–40.

References

1. Moseley M.P., Kirsch K., Falk Soil fracturing E. Ground Improvement (Second Edition). 2004. P. 227.

2. Pleithner M. and Bernatzik W. / A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout. 1953.

3. Bezuijen A., F. van Tol. Compensation grouting in sand, fractures and compaction // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam, 2007. pp. 1257–1262.

4. Chambosse G., Otterbein R. State of the art of Compensation Grouting in Germany // XVth International conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Istanbul. 08.2002.

5. Gafar K., Soga, K., Bezuijen A., Sanders M.P.M. and Tol A.F. van. Fracturing of sand in compensation grouting. Proc. 6st Int. Symposium on Geotech. Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai. 281–286.

6. Raschendorfer, Yu. Zhukov V.N., Mayer K. Compensatory injection as a way to ensure the stability of buildings and structures when tunneling. *Metro and tunnels*. 2008;(4):26–28.

7. Merkin V.E., Valette J.-L. The solution to the problem of minimizing surface sediment during the shield sinking of the Lefortovo road tunnel in Moscow. International scientific and practical conference "Urban underground structures - experience and opportunities for the development of underground space on a commercial basis". M., 2004. pp. 45–48.

8. Smoldyrev, A.E. Technological scheme of compensatory injection of hardening mixtures

into the ground during the construction of the tunnel in Lefortovo. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2000;(1):21–22.

9. Ter-Martirosyan Z.G., Abdulmalek Ala Said. Stress-strain state of the transformed base. *Foundations, foundations and mechanics of Grunt*. 2007;(2):8–11.

7. Chebotaev V.V. Calculations of deformation of the Earth's surface and foundations of engineering structures during tunnel construction: diss. ... Candidate of Technical Sciences. M., 1970.

8. Chunyuk D.Yu., Irtuganova V.R., Safonova K.V. The influence of a geotechnical barrier, arranged by the method of compensatory injection, on the deformation of an existing building during the construction of a tunnel. *Natural and technical sciences*. 2015;(4): 245–248.

9. STO NOSTROY 2.3.18–2011: Strengthening of soils by injection methods in construction. M., 2012. 63 p.

10. Guidelines for the integrated development of the underground space of large cities. M., 2004. 168 p.

11. Protection and alignment of buildings and structures using the technology of compensatory injection / E.N. Bellendir, A.V. Alexandrov, M.G. Zertsalov, A.N. Simutin. *Hydrotechnical construction*. 2016;(2): 15–19.

12. Zertsalov, M.G., A.N. Simutin, A.V. Alexandrov. Technology of compensational injection for the protection of buildings and structures. *Vestnik MGSU*. 2015;(6):32–40.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

ФГБОУВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского» приступил к формированию очередного номера научно-практического журнала «Научный вестник Арктики», ISSN 2542–1220.

Целью издания журнала является широкое освещение положительного опыта интеграции теоретических и прикладных исследований актуальных проблем развития современного образования, науки и производства, информационно-методическое обеспечение в системе подготовки будущих специалистов.

Тематика журнала включает следующие направления:

- технические науки;
- естественнонаучные дисциплины;
- социогуманитарные науки.

Приглашаем Вас принять участие в выпуске журнала

Материалы просим представить в редакционно-издательский отдел до 15.02 и 15.10. текущего года в соответствии с прилагаемыми требованиями для прохождения рецензирования. Статьи, не соответствующие требованиям к оформлению материалов публикаций, рассматриваться редакцией не будут. Материалы не возвращаются.

Статьи, полученные редакцией позже указанного срока, будут рассматриваться для публикации в следующем номере журнала.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Автор высылает в редакцию печатный экземпляр статьи и идентичный вариант на диске или электронную версию статьи по электронной почте с указанием тематического направления. Статья должна быть подписана автором.

Каждый из авторов заключает лицензионный договор на право использования своего результата интеллектуальной деятельности. Для *иногородних авторов* образец договора присылается на адрес электронной почты (**сканированная копия договора, подписанная автором, пересылается на адрес электронной почты редакции**).

2. К статье обязательно прилагаются ее название, Ф.И.О. авторов, аннотация (не более 5–6 строк), ключевые слова (не более 10 слов), приставный библиографический список.

3. *Сведения об авторах должны включать:* фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний и служебный адрес, телефоны, электронный адрес. Если авторов несколько, указать, с кем из них вести переписку.

4. *Информация на английском языке:* Ф.И.О. автора, название статьи, аннотация, ключевые слова, список источников, место работы, должность, ученая степень, звание.

5. Объем статьи не должен превышать 16 страниц текста формата А4, включая таблицы (не более 3) и рисунки (не более 5), список литературы (не более 10–15 источников). Шрифт – *Times New Roman*, отчетливый, размер шрифта 14, через полуторный интервал.

6. Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, набранные в редакторе Microsoft Equation (Word 2003). Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки.

7. Иллюстрационный материал должен быть выполнен четко, в формате, обеспечивающем ясность передачи всех деталей, на белой бумаге, и быть пригодным для прямого воспроизведения.

Таблицы должны иметь заголовки. Допускаются только общепринятые сокращения.

8. Библиографический список приводится в конце статьи в порядке упоминания. В тексте должны быть ссылки на литературу в квадратных скобках. Библиография должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.05–2008.

9. Рукопись должна быть вычитана автором. Редакция оставляет за собой право в случае необходимости редактировать и сокращать статьи.

Уважаемые авторы, в случае невыполнения вышеперечисленных условий статья опубликована не будет!

Материалы публикуются на безгонорарной основе. Плата за публикацию статей с авторов не взимается.

Адрес редакции:

663310, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7,

ФГБОУВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского».

Редакция журнала. Тел. (3919) 47-39-44.

Факс (3919) 42-17-41. E-mail: rio_ngii@norvuz.ru

DEAR COLLEAGUES!

State Higher Educational Establishment «Fedorovsky Polar State University» is delighted to announce that it has started to form the next issue of the scientific journal **SCIENTIFIC BULLETIN OF THE ARCTIC**. Its purpose is a wide interpretation of positive experience in education and future specialists' training issues and practices; assisting in the dissemination of information on research and practice.

SCIENTIFIC BULLETIN publishes papers concerning the following aspects:

- TECHNICAL SCIENCES
- NATURAL SCIENCES
- HUMANITIES SCIENCE

You are invited to submit scientific contributions for the **SCIENTIFIC BULLETIN OF NORILSK INDUSTRIAL INSTITUTE**.

All correspondence concerning manuscripts should reach the Editorial Board **15.02** and **15.10** current year at the latest. The manuscripts received later will be considered for publication in the next issue. The submitted papers are not sent back.

The journal will only respond to and publish articles corresponding to the following **requirements**.

STYLE AND SUBMISSION REQUIREMENTS

1. Submit one hard copy of the manuscript on bond paper. Also submit an appropriate CD-ROM. It should be labelled with: Author's name, title of manuscript.

2. The size of articles should not exceed 16 pages of manuscript, including references (not more than 10–15 sources), tables (not more than 3), figures (not more than 5).

3. The manuscripts should be printed on A4 format pages (standard page – 1800 characters), sesquialteral space, size 14 font (*Times New Roman*), 2 cm left margins and 3 cm right margins, 2,5 cm top and bottom margins.

4. The title page should carry the following information:

- the title of the article in English;
- full name of Author (Authors) and, in case of multicentre studies, institutional affiliations,
- annotation, key words (in Russian and English);
- the list of bibliography enclosed to the article in order of reference. The article should contain references in square brackets of the literature used. Bibliography should be formatted according to State Educational Standard P7.05–2008;

- full name of the institution/ institutions from which the paper originates (in official version).

Author's address for correspondence, including the name of Author, scientific title, address, telephone and fax numbers, e-mail address.

The article should contain the most necessary formulas (Microsoft Equation, Word 2003) Formulas with references are numbered only.

Illustrative material should be convenient, all the details are clearly seen. Charts go with the titles. Only generally accepted abbreviations are allowed.

Every author enters into a license contract for the right of the use of his intellectual activity.

All submitted manuscripts are subjected to editorial review and subsequently peer review.

The Editor will observe the content of the manuscript, however full responsibility for the content of the article lies with the Author. The Editorial Board does not take responsibility for the results of possible unreliability.

Mailing Instructions. Please include your e-mail address if you have one. Manuscripts with requisite hard copies and CD-ROMs should be forwarded to.

Editorial Board,
Fedorovsky Polar State University.
50 Let Oktyabrya, 7
Norilsk, 663310
Krasnoyarsky Region, Russia
(3919) 47-39-44.
FAX: (3919)42-17-41.
E-mail: rio_ngii@norvuz.ru

Научное издание

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК АРКТИКИ

Подписано в печать 20.04.2022.

Бум. для копир.-мн.ап.

Гарнитура *Century*. Печать плоская.

Тираж 100 экз. Зак. 10.

663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7.

E-mail: rio_ngii@norvuz.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета
в отделе ЦИТ ФГБОУВО «ЗГУ»