УДК 624.139.6

© С. Нямдорж, канд. техн. наук, профессор,
инженер-консультант
(Монгольский государственный университет
науки и технологии)
© М. Мягмаржав, канд. техн. наук, инженер-консультант
(ООО «Инжгеотех»)
© А. Батсайхан, аспирант
© Ц. Тамир, магистрант
(Монгольский государственный университет
науки и технологии)
E-mail: nyamdorj_999@yahoo.com

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-52-62

© S. Nyamdorj, PhD in Sci. Tech., Professor,
Consulting Engineer
(Mongolian University of Science and Technology)
© M. Myagmarjav, PhD in Sci. Tech.,
Consulting Engineer
(LLC «Injgeotech»)
© A. Batsaikhan, post-graduate student
© Ts. Tamir, undergraduate
(Mongolian University of Science and Technology)
E-mail: nyamdorj_999@yahoo.com

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРЕЩИН И ПОЛОСТЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ВСЛЕДСТВИЕ ДЕГРАДАЦИИ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ТЕРРИТОРИИ г. НАЛАЙХА В МОНГОЛИИ

SOME RESULTS OF STUDYING CRACKS AND CAVITIES FORMED DUE TO THE DEGRADATION AND DISAPPEARANCE OF PERMAFROST ZONE OF THE NALAYH TOWN IN MONGOLIA

Многолетние мерзлые грунты, распространенные на обширных территориях Монголии, активно деградируют и исчезают под влиянием современного глобального потепления климата. Множество зданий и сооружений, построенных по первому принципу строительства на многолетних мерзлых грунтах (I принцип — вечномёрзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраненном в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения), получили деформации при потере устойчивости основания, что влияет на безопасность сооружений и обеспечение их нормальной эксплуатации. В качестве примера таких случаев рассмотрены результаты проведенных комплексных исследований грунта в основаниях здания в пригороде Улан-Батора городе Налайхе в Монголии. В результате исследований установлено, что причиной образования вертикальных трещин и горизонтальных полостей является деградация многолетней мерзлоты вследствие глобального потепления.

Ключевые слова: вытаивание мерзлого грунта, глобальное потепление, сейсмоактивность, табурированные грунты, строительные нормы.

Long-term permafrost soils, which used to be widely spread in large areas of Mongolia, have been actively degrading and disappearing under the impact of modern global warming. Many buildings and structures built according to the first principle of construction on permafrost soils (namely, permafrost soils of the base are used in the frozen state preserved in the process of construction and during the entire period of operation of the structure), received deformation with loss of stability of the base, which affects the safety of structures and ensuring their normal operation. As an example of such cases, the authors consider the results of the comprehensive study of the soil at the base of the building in the town of Nalayh located in the suburbs of Ulan Bator city. As a result of research it is established that formation of vertical cracks and horizontal cavities is caused by degradation of long-term permafrost owing to the global warming.

Keywords: thawing of frozen soil, global warming, seismic activity, taburiar soils, building norms.

Введение

В августе 2018 года строительная компания и заказчик обратились к Центру геотехнического исследования Монгольского государственного

университета науки и технологии с просьбой установить причины образования трещин и выдать рекомендацию по проектному решению фундамента здания. При разработке грунта

Диаметр провала термокарста 7,0–8,0 м, глубина 3,0–3,5 м.

Длина трещины около 500 м, ширина 10–15 см и более, глубина не определялась.

Установлены причины образования провала и трещин: деградация и исчезновение многолетней мерзлоты.

Геотектоника и сейсмоактивность региона

Территория Монголии относится к высокосейсмоактивной зоне. В окрестностях Улан-Батора обнаружены шесть тектонических разломов, один из них проходит через центр Улан-Батора (рис. 5).

Сейсмичность данного региона составляет 7–9 баллов по шкале MSK-86. В окрестностях Улан-Батора зарегистрированы в 2006 году

более 200, а в 2018 году около 1800 слабых землетрясений. Последние относительно сильные землетрясения зарегистрированы 03.10.2015 (магнитудой 4,5 балла), 24.01.2019 (магнитудой 2,5 балла), эпицентры их находились на расстоянии 10–20 км от Улан-Батора.

Геологическое строение и геоморфология

Налайхский котлован в конце среднего и в начале верхнего палеозоя был дном океана и моря, что видно на литологических разрезах грунтовых отложений, относящихся к временам девона и карбона². После этого дно неоднократно подвергалось тектоническим движениям подъема, сжатия и образовались сильные складчатости, что четко выражено на профиле разреза откоса котлована (рис. 6).

По геоморфологическому типу территория Налайха классифицируется как эрозионно-аккумулятивная выпукло-вогнутая холмистая поверхность. Абсолютная высота места строительства 1480–1590 м, его относительная высота 30–60 м, уклон поверхности 2–4°, длина уклона 2,0 км и более.

Геокриологические условия

Многолетняя мерзлота территории Монголии образована в период позднего плейстоцена и раннего голоцена. В это время процессы криохрона (агградация мерзлоты) и термохрона (деградация мерзлоты) неоднократно повторялись.

² Инженерно-геологические исследования подземных трещин и полостей, обнаруженных в котловане фундамента здания в г. Налайхе Монголии: отчет. ООО «Инжгеотех». Улан-Батор, 2019.

Рис. 5. Схема расположения глубинных разломов в окрестностях Улан-Батора (М. Улзийбат, Б. Баттулга)

Рис. 6. Панорама стены котлована здания

Возраст 12–18 тыс. лет (Алтай-Тунгусское обледенение) [2, 5]. Толщина от 4,0 м до нескольких десятков метров. Классификация грунтов по П. И. Колоскову и В. А. Кудрявцеву [4]:

- по температуре: пластичные и потенциально мерзлые ($t_{\text{ср}} = 0-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), твердые мерзлые ($t_{\text{ср}} < -2\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- по происхождению: сингенетические и эпигенетические;
- по распространению: сплошные, островные, перерывистые грунты;
- по литологии: сливающиеся и несливающиеся грунты;
- по типам деятельного слоя: особенно резко континентальные, амплитуда колебания годовых температур больше $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (около $70\text{ }^{\circ}\text{C}$), глубина сезонного промерзания 2,7–4,8 м.

Сравнение по картам (рис. 7) показывает, что площадь многолетних мерзлых грунтов, распространенных на территории Монголии, сильно сокращается. Сокращение произошло примерно в 2 раза (особенно пластично-мерзлые грунты) под влиянием глобального потепления и техногенных воздействий.

Измерение температур

С целью определения условий температурного режима проводились измерения температуры грунтов в четырех характерных скважинах

(Скв-1; 2; 9; 10) с шагом по глубине 1,0 м с использованием приборов НОВО Logger U-12, НОВО Pendant (США). Охватываемая глубина измерения от 7,0 м до 18,0 м от дневной поверхности³. Данные измерений зафиксированы в табл. 1 и на рис. 8.

По результатам измерений не обнаружены грунты с отрицательной температурой. Исходя из этого можно сделать вывод, что многолетняя мерзлота на данной строительной площадке полностью исчезла вследствие глобального потепления и техногенных воздействий.

Исследование подземных трещин и полостей

В рамках проведенных исследований с целью установления причин и обнаружения новых трещин и полостей^{4,5} [5–6] были пробурены 12 скважин диаметром 146 мм и глубиной 20,0 м. В 40 точках по методам биолокации и GPS были определены пять вертикальных трещин, а также установлены их координаты (рис. 9). С помощью видеозаписи и фотографии обнаружены многочисленные горизонтальные трещины и полости на различных глубинах скважин (рис. 10). Обнаруженные трещины по классификациям [4, 6] относятся к следующим типам:

- по происхождению: нетектонические трещины усыхания [1, 3, 6], первой генерации [2, 6];
- по строению и текстуре: бывшие льды сетчатые с прослойками, жилами и шлирами, их

³ Инженерно-геологические исследования подземных трещин и полостей, обнаруженных в котловане фундамента здания в г. Налайхе Монголии: отчет. ООО «Инжгеотех». Улан-Батор, 2019.

⁴ Там же.

⁵ БНБД 50-01–16. Барилгын буурь ба суурийн зураг төсөл зохиох норм ба дүрэм. Улаанбаатар, 2016.

Таблица 1

Результаты температурных измерений

Глубина от дна котлована, м	Температура, °C			
	Скв-1	Скв-2	Скв-9	Скв-10
3,0	1,872	2,396		
4,0	2,624	2,021		
5,0	2,730	2,503		
6,0	2,624	2,517		
7,0	2,547	2,289	3,049	2,262
8,0	2,517	2,423	2,943	2,450
9,0	2,303	2,182	2,624	2,128
10,0	2,088	1,980	2,517	2,303

Рис. 7. Карты геокриологии территории Монголии по состоянию на 1971 и 2015 г.

Рис. 8. Кривые температурных измерений по глубине

Рис. 9. Схема расположения старых и вновь обнаруженных трещин

Рис. 10. Фотографии подземных полостей: а — Сква-11, $H = 7,2$ м, направление с севера на восток; б — Сква-11, $H = 7,35$ м, направление с востока на север; в — Сква-11, $H = 9,5$ м, направление на юг; г — Сква-11, $H = 9,0$ м, направление с востока на юг

следы после деградации и вытаивания льда показаны на рис. 10.

После вытаивания льдов образовались табурированные четвертичные отложения грунтов (по А. И. Шеко [9]).

Прессометрические испытания

Для оценки деформационных свойств (E) грунтов основания на дне котлована в четырех скважинах на 13 точках литологических разрезов по стандартным⁶ [7, 8] методам проводились прессометрические испытания (рис. 11, 12), результаты которых представлены в табл. 2.

⁶ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований.

Рис. 11. Проведение прессометрических испытаний

Рис. 12. Проведение испытаний

По анализу результатов прессометрических испытаний табурированные грунты основания относятся к относительно плотным и прочным гравийно-галечниковым грунтам с суглинистыми и песчаными заполнителями.

Стандарт-пенетрационные испытания (СПТ)

Для сравнения деформативных показателей проводили стандарт-пенетрационные испытания в 17 точках (табл. 3) и сравнивали их результаты с прессометрическими испытаниями. Сходимость результатов при сравнении оказалась в допустимых пределах (рис. 13).

По обобщенным результатам СПТ и прессометрических испытаний грунты основания строительной площадки относились бы к сред-

Таблица 2

Результаты прессометрических испытаний

Скважины	№ слоя	Название грунтов	E , МПа
Скв-7	I	Гравийно-галечниковый грунт с песком	27,0
	II	Гравийно-галечниковый грунт с пылеватым суглинистым заполнителем	45,0
Скв-8	I	Гравийно-галечниковый грунт с песком	25,0
	II	Гравийно-галечниковый грунт с пылеватым суглинистым заполнителем	46,0
	III	Тощая глина с песчаными включениями	47,0
Скв-10	I	Песок с гравийно-галечниковыми включениями	45,0
	II	Гравийно-галечниковый грунт с пылеватым суглинистым и песчаным заполнителем	46,0
	III	Песок	21,0
	IV	Тощая глина с песком	47,0
Скв-11	I	Гравийно-галечниковый грунт с супесчаным заполнителем	45,0
	II	Гравийно-галечниковый грунт с песчаным заполнителем	27,0
	III	Гравийно-галечниковый грунт с суглинистым заполнителем	45,0
	IV	Тощая глина с песчаными включениями	47,0

Рис. 13. Сравнение кривых E по СПТ и прессометру

неплотным и плотным, относительно прочным табурированным грунтовым отложениям, если бы не было глубинных подземных трещин и полостей. На рис. 14 показан характерный профиль колонок литологических разрезов.

Геофизические исследования

С целью определения наличия и характеристик трещин и полостей проводили геофизические испытания в соответствии с методиками, указанными в нормативных документах^{7,8} и литературе [7]. Сейсмологические замеры скорости и времени прохождения волн P , S провели с помощью приборов McSeis-SX, Borehole risk 3315 (рис. 17), георадарные испытания — по двум профилям, частота 250 МГц, до глубины 7 м от дна котлована.

По результатам измерений времени прохождения и скоростей волн P , S и записей, сделанных на глубине 15,6 м от дна котлована ($T_{zp} = 10$ мс, $T_{zs} = 52$ мс) существенные изменения скорости S волны зафиксированы на глубинах 4,6 м; 8,1 м; 12,5 м (рис. 18–21)⁹.

⁷ БНБД 50-01-16. Барилгын буурь ба суурийн зураг төсөл зохиох норм ба дүрэм. Улаанбаатар, 2016.

⁸ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований.

⁹ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований.

Таблица 3

Результаты стандарт-пенетрационных испытаний

№	Наименование грунтов	Номер скважины	Глубина, м	Число ударов	Индекс плотности %	ϕ , %	Корректированное значение SPT, N	Расчетное давление, тс/м ² R _c	Состояние плотности	E, МПа. /для сравнения		
										По пенетрации	По Прессометру	
1	Гравийно-галечниковый грунт с <u>супесчаным</u> заполнителем	скважина-11	1	47	89	40	56	42	очень плотный	48	45	
			2	44	86	39	53	40	очень плотный	48		
2	Гравийно-галечниковый грунт с <u>песчаным</u> заполнителем		5	9	36	32	11	8	средний плотный	28	27	
			6	11	40	32	13	10	средний плотный	29		
3	Гравийно-галечниковый грунт с <u>супесчаным</u> заполнителем		7	15	47	33	18	14	средний плотный	33	45	
			8	40	83	38	48	36	очень плотный	48		
			9	42	85	39	50	38	очень плотный	48		
			10	44	86	39	53	40	очень плотный	48		
			11	46	88	39	55	41	очень плотный	48		
			12	44	86	39	53	40	очень плотный	48		
4	Тошная глина с <u>песчаными</u> включениями		13	60	92	40	72	54	очень плотный	49	47	
			15	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			16	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			17	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			18	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			19	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			20	60	92	40	72	54	очень плотный	49		
			Примечания: *Глубина из дна котлована *Индекс плотности, ϕ , расчетное давление — по методу Митчеля и Кати *E, модуль деформации — по методу Шульца и Мелсера									

Рис. 14. Профиль колонки литологического разреза, Скв-11

Рис. 15. Линии геофизических профилей

Результаты сейсмологических изысканий

Скорость волн P по всем глубинам 1870–2000 м/с, скорость поперечных волн S до глубины 5,6 м зафиксирована 320 м/с, от глубин 5,6 м до 13,6 м зафиксирована скорость 362 м/с; отношение скорости волн P и S составило от 5,08

Рис. 16. На стройплощадке

Рис. 17. Схема работы приборов McSEIS-SX и Borehole r3315 (Япония)

Рис. 18. Запись времени (T) прохождения волн P ; S Рис. 20. Разрез по линии 1Д скорости прохождения волны S в 24 скважинах Рис. 19. Кривая зависимости скорости V_p и V_s волн по глубине от времени

до 5,83. Обнаружены разрыхленные трещиноватые зоны грунтов на глубине до 8,0 м от дна котлована, которые попадают в зону сжимаемой толщи грунтов основания здания.

Георадарные испытания

Результаты проведенных исследований по двум профилям (рис. 22) с частотами волны 250 МГц, до глубины 7,0 м от дна котлована (11,0 м от дневной поверхности) показывают¹⁰,

¹⁰ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований.

Рис. 21. График результатов измерений скорости прохождения волны S

что в глубинах от 4,0 до 11,0 м зафиксированы разрыхленные и трещиноватые породы.

Обобщение результатов проведенных исследований дает возможность установить причины образования трещин и полостей, обнаруженных на поверхности разработанного котлована под фундамент здания.

Выводы

1. В результате проведенных исследований установлено, что причиной образования вертикальных трещин и горизонтальных полостей является деградация многолетней мерзлоты вследствие глобального потепления.

2. Хотя территория окрестностей Улан-Батора, в том числе территория г. Налайх, явля-

Рис. 22. Результаты георадарного исследования:
а — профиль 1; б — профиль 2

ется очень сейсмоактивной зоной, в данном случае землетрясение не является прямой причиной образования трещин, а могло оказать только активизирующее косвенное влияние.

3. В результате вытаявания многолетних мерзлых пород грунта основания образовалось табурированное четвертичное отложение. Эти грунты являются наиболее неблагоприятными и сложными грунтами для основания зданий и сооружений по отношению обеспечения критериев расчетов грунта основания по предельным состояниям (I и II).

4. Эти проблемы характерны не только для данного региона и являются глобальными. В связи с этим нам, геотехникам, выдаются задачи для решений конкретных вопросов следующего содержания:

- разработка методики проведения инженерно-геологических изысканий, полевых и лабораторных испытаний табурированных грунтов для определения расчетных характеристик и других параметров;
- решение проблемы обеспечения эксплуатационных условий надежности и безопасности ранее построенных по первому принципу

зданий и сооружений на многолетних мерзлых грунтах, ставших в настоящее время табурированными и табурированными грунтами. Таких зданий и сооружений много по всей территории Монголии, значительная часть из них в какой-то мере деформирована, находится в аварийном состоянии и нуждается в ремонте и восстановлении, а некоторые даже подлежат сносу;

- разработка методики инженерных расчетов и принципов проектирования основания и фундаментов на табурированных грунтах. Может быть, необходимо сделать дополнение и актуализацию действующих нормативных документов, применимых в таких условиях. В существующих нормативных документах и литературных источниках проблемы изыскания, расчета и проектирования на табурированных грунтах отражены крайне скудно или даже отсутствуют, например в действующих нормах СН 11-105-97 и БНБД 50-01-16 в основном даны указания по проектированию оснований и фундаментов в условиях сиффозионных и химических карстов.

5. Даны рекомендации:

- по подготовке основания и устранению трещин и полостей методом цементации;
- выбору типа фундамента;
- проектированию фундамента с обеспечением условий и критериев теории расчетов по I и II предельным состояниям.

Библиографический список

1. Бойцов А. В. Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 178 с.
2. Каплина Т. Н. Аласные комплексы Северной Якутии // Криосфера земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 3–17.
3. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 15–18.
4. Общее мерзловедение (геокриология) / под ред. В. А. Кудрявцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
5. Попов А. И. Подземный лед: сб. ст. Вып. II. М.: Изд-во МГУ, 1965. 182 с.
6. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
7. Шувалов В. М. Инженерно-геологические и геофизические исследования карста в Пермской области // «Карстоведение XXI век: теоретическое и практическое значение»: материалы междунар. симпозиума. Пермь, 25–30 мая 2004 г. С. 95–102.

8. Трофименков Ю. Г., Воробков Л. Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.

9. Шеко А. И. Теоретические основы и методы прогноза инженерно-геологических процессов // Оползни и сели: сб. докл. междунар. семинара. Алма-Ата, 1981. С. 115–118.

References

1. Boytsov A. V. *Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony* [Geocryology and groundwater in permafrost zone]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2011, 178 p.

2. Kaplina T. N. *Alasnye komplekсы Severnoy Yakutii* [Alas complexes of Northern Yakutia]. *Kriosfera zemli – Cryosphere of the earth*, 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 3–17.

3. Konishchev V. N. *Reaktsiya vechnoy merzloty na poteplenie klimata* [Permafrost response to the climate warming]. *Kriosfera zemli – Cryosphere of the earth*, 2011, vol. XV, no. 4, pp. 15–18.

4. *Obshchee merzlotovedenie (geokriologiya)* [The total permafrost science (Geocryology)]. 2-nd ed., revised. Ed. by Kudryavtsev V. A. Moscow, MGU Publ., 1978, 464 p.

5. Popov A. I. *Podzemnyy led. Sb. st.* [Underground ice. Coll. of articles]. Iss. II. Moscow, MGU Publ., 1965, 182 p.

6. Romanovskiy N. N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere]. Moscow, MGU Publ., 1993, 336 p.

7. Shuvalov V. M. *Inzhenerno-geologicheskie i geofizicheskie issledovaniya karsta v Permskoy oblasti* [Engineering-geological and geophysical studies of karst in Perm region]. *Trudy mezhdunar. simpoziuma «Karstovedenie XXI vek: teoreticheskoe i prakticheskoe znachenie»* [Proc. of the Int. symposium «Karst investigations in the XXI century: theoretical and practical value»]. Perm, May 25–30, 2004, pp. 95–102.

8. Trofimenkov Yu. G., Vorobkov L. N. *Polevye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov* [Field methods of building properties of soil investigation]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 215 p.

9. Sheko A. I. *Teoreticheskie osnovy i metody prognoza inzhenerno-geologicheskikh protsessov* [Theoretical foundations and methods of forecasting of geological processes]. *Trudy mezhdunar. Seminara «Opolzni i seli»* [Proc. of the Int. seminar «Landslides and mudflows»]. Alma-Ata, 1981, pp. 115–118.