Сергей Сергеевич ПРИМАКОВ[1]
Игорь Васильевич ЗАБОРА[2]
Эдуард Абрамович АРИНШТЕЙН[3]
Алексей Викторович ТАТОСОВ[4]

УДК 662.5

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОЦЕНКУ НАДЕЖНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ СЕЗОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ

[1] кандидат технических наук, начальник отдела геотехнического мониторинга и температурной стабилизации грунтов, ООО «Газпром проектирование»
primakovss@yandex.ru

[2] аспирант кафедры механики многофазных систем, Тюменский государственный университет;
инженер I категории, отдел геотехнического мониторинга и температурной стабилизации грунтов, ООО «Газпром проектирование»
ZaboraIV@yandex.ru

[3] доктор физико-математических наук, профессор, профессор-консультант, Тюменский государственный университет
e.a.arinshtejn@utmn.ru

[4] доктор физико-математических наук, профессор кафедры фундаментальной математики и механики, Тюменский государственный университет
atatosov@utmn.ru

Цитирование: Примаков С. С. Влияние динамики распределения температуры многолетнемерзлых грунтов на оценку надежности фундаментов на примере сезонного изменения несущей способности свай / С. С. Примаков, И. В. Забора, Э. А. Аринштейн, А. В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 41-50.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Аннотация

Сибирь является центром топливно-энергетического комплекса России, где ведется разработка углеводородов, создана разветвленная сеть трубопроводов, планируются и проектируются новые крупномасштабные проекты. Строительство и поддержание инфраструктуры по всему северу нашей страны, является очень важной задачей. Обустройство свайных конструкций и фундаментов представляет собой основу всего строительства на многолетнемерзлых грунтах.

В статье предложен алгоритм и подробно описана методика учета различных факторов, влияющих на комплекс сил, воздействующих на сваю в грунте, позволяющая повысить качество расчета несущих способностей свай.

Ключевые слова

Сваи, несущая способность сваи, морозное пучение, расчет полезной нагрузки, силы негативного трения, распределение температуры.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50

Введение

Одним из наиболее развитых Арктических районов российского сектора является Западная Сибирь, где активно ведется разработка углеводородных месторождений, создана развитая трубопроводная сеть, построены такие города, как Надым, Новый Уренгой, и другие. Строительство и поддержание инфраструктуры по всему северу нашей родины, осложняется не только суровыми климатическими условиями, удаленностью регионов от городов, но и наличием многолетнемерзлых грунтов (ММГ), занимающих обширную территорию всей страны в целом, около 73%. За последние 50 лет освоения Севера разработано большое количество нормативных документов, методик решения проблем строительства в неблагоприятных условиях, но, несмотря на все многообразие решений задач в строительстве на многолетнемерзлых грунтах (ММГ), окончательное решение проблемы взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами так и не было достигнуто.

Основная часть

Проектирование фундаментов в районах распространения вечномерзлых грунтов, является сложной задачей, правильное решение которой возможно только с учетом процессов, происходящих в деятельном слое и слое вечномерзлого грунта. Сезонное изменение температуры грунта происходит круглогодично во всей толще грунта, наиболее интенсивно — до глубины 10 м. Изменение отрицательной температуры грунта в диапазоне от –0,2 до –2,7 ºС влечет за собой изменение значения расчетного давления на мерзлые грунты R (кПа) под нижним концом сваи в несколько раз. Причем изменения температуры, близкой к 0 ºС, влекут более существенные изменения в значениях R, чем изменения при более низких температурах. Так, при понижении температуры в мелких и пы-

леватых песках, от минус 0,3 до минус 0,5 ºС, величина расчетного давления R увеличивается с 850 кПа до 1 300 кПа, что составляет повышение на 52,9%, а при понижении температуры с -3 до -3,5 ºС, в тех же грунтах, увеличение значения R составляет уже 5,3%, с 1 900 кПа до 2 000 кПа. [Таблица В. 1 с. 61 СП 25.13330.2012] [4]. Учитывая, что, как правило, колебания температуры многолетнемерзлых грунтов находятся в диапазоне от минус 0,1 до минус 1,0 ºС, расчетное давление на мерзлые грунты в течении годового цикла меняется в разы. А поскольку распределение температуры в грунте имеет характер синусоиды с переменной по глубине амплитудой, то и изменение механических свойств грунта имеют сложный характер [1].

На сегодняшний день в основе расчетов несущих способностей свай и различных негативно влияющих на них сил лежит актуализированная версия СНиП 2.02.04-88 *«Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» СП 25.13330.2012*.

Данный документ позволяет учитывать температурный вклад в несущую способность свайных конструкций, однако расчет проводится на основе среднегодовых значений температуры по слоям [4]. В случаях, когда инженерные изыскания содержат данные по термометрии, для расчетов могут быть использованы фактические температуры. Тем не менее, при таком подходе отсутствует возможность учитывать динамику изменения температуры с течением времени, как в течение естественных сезонных колебаний, так и в процессе эксплуатации [3].

При выполнении расчетов несущих способностей свай необходимо учитывать весь комплекс сил, действующих в тот или иной период времени на сваю. В свою очередь, изменения значений температуры грунта как по глубине так и по времени влияют так же на величину силы морозного пучения Fp, силы негативного трения Fneg, расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи R, сопротивление мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания Raf. Которые зависят, как от геологии данного участка, так и от значения температуры в каждой конкретной точке [4].

Проведя ряд исследований, основанных на полученных теоретических и фактических экспериментальных данных, была предложена методика, позволяющая определять динамику несущей способности сваи в течении годового цикла. Предлагаемый подход основан на использовании заранее известной годовой динамики распределения температуры грунта по глубине, определенной по результатам термометрии, проведенной, например, в рамках геотехнического мониторинга [2] (рис. 1). Рассчитывая несущую способность сваи с учетом температурного состояния грунтов каждого месяца или недели, может быть получен набор годовых эпюр несущих способностей свай, негативное трение, результирующие силы в различные месяцы.

Из рис. 1 видно, что значения температур грунта меняются как с течением времени, так и по слоям. При этом для каждого слоя в разный момент времени существуют свои температурные максимум и минимум, отличные от других. Поэтому заранее невозможно определить некоторую универсальную дату, с

i- слой	h,м	янв	февр	март	апр	май	июнь	июль	авг	сент	окт	ноя	дек
1	0,1	-11,93	-11,64	-8,87	-5,35	2,32	21,29	25,75	20,53	9,43	0,00	-5,71	-9,85
2	0,2	-11,30	-11,20	-8,66	-5,37	0,00	14,59	20,62	17,85	9,25	0,69	-4,80	-9,09
3	0,3	-10,67	-10,76	-8,43	-5,37	-0,24	7,99	15,56	15,14	8,97	1,71	-3,93	-8,34
4	0,4	-9,98	-10,26	-8,16	-5,36	-0,45	3,78	12,34	13,35	8,68	2,28	-3,00	-7,51
5	0,5	-9,21	-9,69	-7,85	-5,33	-0,68	1,87	10,89	12,52	8,50	2,50	-1,99	-6,61
6	0,6	-8,45	-9,12	-7,52	-5,29	-0,91	0,00	9,47	11,68	8,28	2,68	-1,01	-5,73
7	0,7	-7,69	-8,54	-7,18	-5,24	-1,13	-0,09	8,09	10,82	8,02	2,81	0,00	-4,87
8	0,8	-6,95	-7,96	-6,82	-5,17	-1,33	-0,18	6,76	9,95	7,70	2,89	0,01	-4,03
9	0,9	-6,22	-7,37	-6,46	-5,09	-1,53	-0,26	5,48	9,08	7,35	2,94	0,02	-3,20
10	1	-5,49	-6,78	-6,08	-5,00	-1,71	-0,34	4,26	8,19	6,95	2,93	0,02	-2,39
11	1,1	-4,78	-6,18	-5,69	-4,90	-1,88	-0,42	3,11	7,29	6,51	2,89	0,03	-1,60
12	1,2	-4,07	-5,57	-5,29	-4,79	-2,03	-0,50	2,01	6,39	6,04	2,81	0,04	-0,81
13	1,3	-3,38	-4,96	-4,87	-4,67	-2,17	-0,58	0,97	5,49	5,53	2,69	0,04	0,00
14	1,4	-2,70	-4,35	-4,46	-4,54	-2,29	-0,65	0,00	4,58	4,99	2,54	0,04	0,00
15	1,5	-2,02	-3,73	-4,03	-4,41	-2,40	-0,72	-0,06	3,66	4,43	2,36	0,04	0,00
16	1,6	-1,35	-3,11	-3,60	-4,27	-2,49	-0,79	-0,12	2,75	3,85	2,16	0,04	0,00
17	1,7	-0,69	-2,49	-3,16	-4,12	-2,56	-0,86	-0,18	1,83	3,26	1,93	0,04	0,00
18	1,8	0,00	-1,87	-2,71	-3,97	-2,62	-0,92	-0,24	0,91	2,67	1,68	0,04	0,00
19	1,9	0,00	-1,24	-2,26	-3,82	-2,67	-0,98	-0,30	0,00	2,10	1,42	0,04	0,00
20	2	0,00	-0,62	-1,81	-3,67	-2,70	-1,03	-0,35	-0,04	1,54	1,15	0,03	0,00
21	2,1	0,00	0,00	-1,37	-3,52	-2,72	-1,08	-0,40	-0,07	1,00	0,87	0,03	0,00
22	2,2	0,00	0,00	-0,91	-3,37	-2,73	-1,13	-0,45	-0,11	0,48	0,58	0,02	0,00
23	2,3	0,00	0,00	-0,46	-3,22	-2,73	-1,17	-0,49	-0,15	0,00	0,29	0,01	0,00
24	2,4	0,00	0,00	0,00	-3,07	-2,71	-1,22	-0,54	-0,18	-0,03	0,00	0,01	0,00
25	2,5	0,00	-0,01	-0,01	-2,93	-2,70	-1,26	-0,58	-0,22	-0,06	-0,02	0,00	0,00
26	2,6	-0,01	-0,02	-0,02	-2,78	-2,67	-1,29	-0,62	-0,25	-0,09	-0,04	-0,02	-0,01
27	2,7	-0,02	-0,03	-0,03	-2,64	-2,64	-1,32	-0,66	-0,28	-0,12	-0,06	-0,03	-0,03
28	2,8	-0,03	-0,04	-0,04	-2,51	-2,60	-1,35	-0,69	-0,32	-0,14	-0,08	-0,05	-0,04
29	2,9	-0,04	-0,05	-0,05	-2,38	-2,56	-1,38	-0,73	-0,35	-0,17	-0,10	-0,06	-0,05
30	3	-0,06	-0,06	-0,05	-2,25	-2,51	-1,41	-0,76	-0,38	-0,20	-0,11	-0,08	-0,06

Рис. 1. Фрагмент годовой динамики распределения температуры грунта по глубине

Fig. 1. Fragment of the annual distribution dynamics for soil temperature by depth

наихудшими условиями для расчета несущих способностей свайного основания. Таким образом, для оценки рисков при эксплуатации свайного сооружения необходимо провести расчеты на каждую дату и определить динамику несущей способности сваи.

Полученное распределение температур позволяет нам произвести расчеты несущей способности во всем измеряемом временном интервале, что дает нам возможность оценить динамику изменений несущих способностей как по боковой поверхности, так и под нижним острием сваи. На рис. 2 предоставлены эпюры расчетных значений несущих способностей по месяцам для свай длиной 5 м и 10 м.

Полученные значения несущей способности под острием сваи длиной 5 м в определенные моменты времени превышают значения несущей способности для 10 метровой сваи практически в 2 раза. При этом разброс в значениях несущей способности под острием для сваи в 5 м значителен: от 985,01 (кгс) в марте до 2 944 (кгс) в мае и составляет 1 958,99 (кгс). В свою очередь, для 10-метровой сваи разброс не так значителен: от 1 420,05 (кгс) в апреле до 1 652,6 (кгс) в сентябре и составляет всего 232,55 (кгс).

На рис. 3 приведены значения сил морозного пучения и негативного трения по месяцам. Как известно, значения этих сил очень сильно зависят от геологии участка погружения сваи, тем не менее из рис. 4 можно увидеть изменение значений этих сил во времени, обусловленное динамикой температуры грунта.

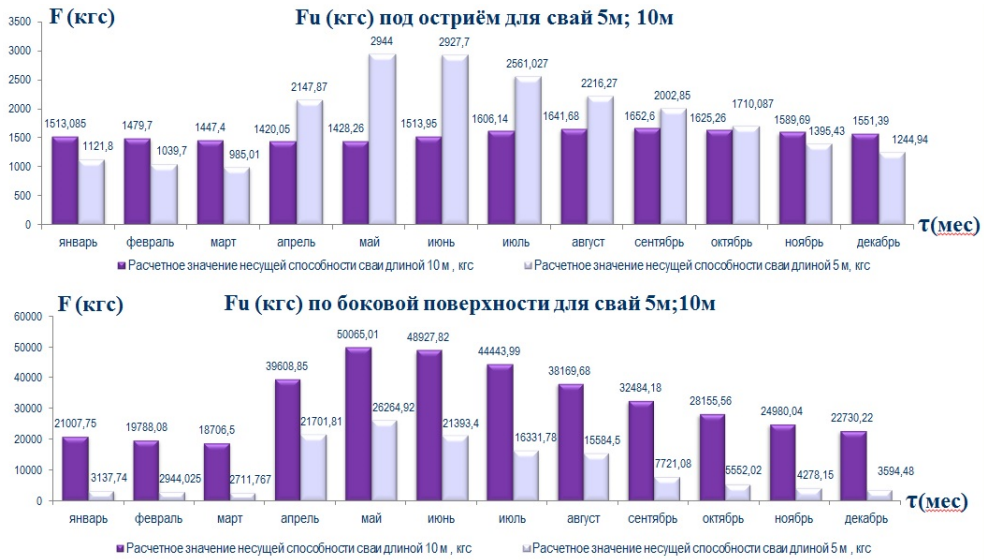

Рис. 2. Эпюры значений несущих способностей свай длиной 5 м и 10 м под острием свай и по боковой поверхности смерзания

Fig. 2. Diagrams of the values of bearing capacity, 5 m and 10 m long poles, under the pole tip and along the side surface of the freezing

Рис. 3. Значения сил морозного пучения и негативного трения во всем временном интервале расчетной области

Fig. 3. The values of frost heave and negative friction forces in the entire time interval of the computational domain

Результаты расчета проверки на вдавливание для свай длиной 5 м и 10 м в разные промежутки времени приведены на рис. 4. Обнаружено, что минимальное значение несущей способности при проверке на вдавливание в слабо-пучинистом грунте для сваи длиной в 10 м приходится на март месяц, а для сваи длиной 5 м в том же грунте минимальное значение несущей способности приходится на ноябрь месяц. При этом значение несущей способности 10-метровой сваи в сильно-пучинистом грунте больше, чем в слабо-пучинистом грунте в один и тот же момент времени. Это подтверждает отсутствие заранее известной определенной даты с наихудшими, с точки зрения несущей способности сваи, температурными условиям грунта. Это, в свою очередь, говорит о необходимости определения целесообразности применения противопучинистых мероприятий и расчета их эффективности, поскольку впоследствии они могут снижать несущую способность сваи на вдавливание и, следовательно, снижать несущую способность сваи.

Анализ значений несущей способности при вдавливании 5-метровой сваи в сильно-пучиностом грунте, показывает, что свая в состоянии нести полезную нагрузку порядка 6,5 тонн.

В свою очередь, при проверке на выдергивание (рис. 5) видно, что для предотвращения выпучивания сваи в моменты с максимальным морозным пучением необходимо приложить полезную нагрузку порядка 14 тонн, что противоречит проверке на вдавливание.

Таким образом, свая длиной 5 м технологически неприменима в данных геологических условиях при любой нагрузке.

Рис. 4. Значения удерживающих сил по месяцам при вдавливании сваи в сильно и слабо-пучинистых грунтах для свай длиной 5 м и 10 м

Fig. 4. The values of restraint forces by months when the pole is pushed into strongly and slightly frostheaving soils, for 5 m and 10 m long poles

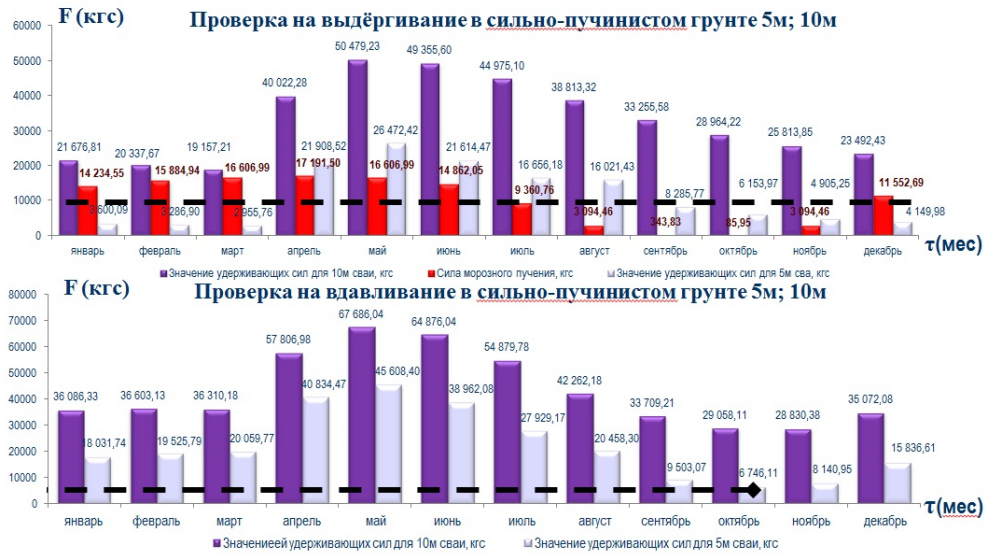

Рис. 5. Анализ несущей способности на вдавливание и выдергивание при заданной нагрузке

Fig. 5. Analysis of the bearing capacity for indentation and pulling at a given load

Проведя анализ для сваи длиной в 10 м аналогичным образом, можем наблюдать, что при проверке на вдавливание ее полезная нагрузка составляет порядка 28 тонн. В свою очередь, при проверке на выдергивание в моменты с максимальным морозным пучением грунта для сваи длиной в 10 м не требуется прилагать дополнительную полезную нагрузку, так как удерживающие силы превосходят силы морозного пучения в их максимальном значении на 2 550 (кгс).

В данных геологических условиях 10-метровая свая технологически проходит все вышеперечисленные проверки и может применяться в последующих конструктивных решениях.

Заключение

1. Силы, действующие на разные участки сваи, меняются в течение года в связи с изменением распределения температуры грунта.
2. Оценка несущей способности сваи может быть проведена только на основе ранее определенной динамики температур грунта.
3. Оценка несущей способности может быть проведена только путем анализа динамики каждой из действующих на сваю сил в отдельности.
4. Отсутствует заранее определенная универсальная дата в году с наихудшими параметрами для любой конструкции сваи или любых геологических и климатических условий.
5. Результаты расчета показывают существование некоторых конструктивных ограничений свай при определенных геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев В. Г. Мероприятия по изменению режима теплообмена на поверхности земли и их влияние на распределение температуры в грунте / В. Г. Кондратьев, А. Г. Перекупка, С. С. Примаков, А.С. Петрова // Нефтяное хозяйство, 2012.
2. Министерство нефтяной и газовой промышленности СССР. РД 39-Р-088-91 «Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонно-мерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности». 1991.
3. Примаков С.С. Актуальность прогнозирования геокриологической ситуации при проектировании в районах распространения ММГ / С. С. Примаков, А. Н. Бердышев, И. В. Забора // V-я Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Обеспечение эффективного функционирования газовой отрасли», 2017.
4. СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» СП 25.13330.2012.

Sergey S. PRIMAKOV[1]
Igor V. ZABORA[2]
Eduard A. ARINSHTEYN[3]
Aleksey V. TATOSOV[4]

THE INFLUENCE OF THE DYNAMICS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OF PERMAFROST SOILS ON ASSESSING THE FOUNDATIONS' RELIABILITY ON THE EXAMPLE OF A SEASONAL CHANGE IN THE BEARING CAPACITY OF POLES

[1] Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Geotechnical Monitoring and Temperature Stabilization of Soils, Gazprom proyektirovanie
primakovss@yandex.ru

[2] Postgraduate Student, Department of Mechanics of Multiphase Systems, University of Tyumen;
1st Category Engineer, Department of Geotechnical Monitoring and Temperature Stabilization of Soils, Gazprom proyektirovanie
ZaboraIV@yandex.ru

[3] Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
University of Tyumen
e.a.arinshtejn@utmn.ru

[4] Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Fundamental Mathematics and Mechanics
University of Tyumen
atatosov@utmn.ru

Abstract

Siberia is the center of the fuel and energy complex of Russia. Here hydrocarbons are developed, an extensive network of pipelines has been created, and new large-scale projects are

Citation: Primakov S. S., Zabora I. V., Arinshteyn E. A., Tatosov A. V. 2017. "The Influence of the Dynamics of Temperature Distribution of Permafrost Soils on Assessing the Foundations' Reliability on the Example of a Seasonal Change in the Bearing Capacity of Poles". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 4, pp. 41-50. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50

© University of Tyumen

planned and organized. The construction and maintenance of the infrastructure throughout the north of our country is a fundamental task. The construction of pile structures and foundations is the basis of all constructions on permafrost soils.

This article proposes an algorithm for and provides a detailed description of the method, which accounts for various factors affecting the complex of forces acting on the poles in the ground, which allows to improve the calculation of the pole's carrying capacity.

Keywords

Piles, bearing capacity of piles, frost heave, calculation of payload, forces of negative friction, temperature distribution.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-41-50

REFERENCES

1. Kondratyev V. G., Perekupka A. G., Primakov S. S., Petrova A. S. 2012. "Meropriyatiya po izmeneniyu rezhima teploobmena na poverkhnosti zemli i ikh vliyanie na raspredelenie temperatury v grunte" [Measures for Changing the Regime of Heat Exchange on the Surface of the Earth and Their Effect on the Temperature Distribution in the Ground]. Neftyanoe khozyaystvo.
2. USSR Ministry of Oil and Gas Industry. 1991. RD 39-R-088-91 "Instruktsiya po opredeleniyu temperaturnogo rezhima vechnomerzlykh i sezonnomerzlykh gruntov i prognozirovaniyu posledstviy izmeneniya teplovykh usloviy na poverkhnosti" [Instruction for Determining the Temperature Regime of Permafrost and Seasonally Frozen Soils and Predicting the Consequences of Changes in Thermal Conditions on the Surface].
3. Primakov S. S., Berdyshev A. N., Zabora I. V. 2017. "Aktual'nost' prognozirovaniya geokriologicheskoy situatsii pri proektirovanii v rayonakh rasprostraneniya MMG" [The Urgency of Predicting the Geocryological Situation When Designing in the MMG Distribution Areas]. Proceedings of the 5th All-Russian Research Conference for young researchers and specialists "Obespechenie effektivnogo funktsionirovaniya gazovoy otrasli" [Ensuring the Effective Functioning of the Gas Industry].
4. SNiP 2.02.04-88 "Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh" [Bases and Foundations on Permafrost Soils] SP 25.13330.2012.