

УДК 699.841:624.139

Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами

П. А. Пегин, Д. С. Филимонов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Пегин П. А., Филимонов Д. С. Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 878–890. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-878-890

Аннотация

Цель: Анализ накопленного опыта проектирования и строительства зданий в районах с многолетнемерзлыми грунтами и сейсмической активностью. **Методы:** Применены статистические и аналитические методы. **Результаты:** Рассмотрены районы совместного распространения многолетнемерзлых грунтов и сеймики на территории России. Приведен обзор и анализ принципов строительства на многолетнемерзлых грунтах. Рассмотрены и проанализированы 2 основных способа сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии при использовании I принципа строительства и 3 комбинированных варианта при сочетании свайного фундамента с проветриваемым подпольем, подсыпкой и охлаждающими устройствами. Сделан вывод о строительстве с использованием I принципа, где в качестве фундамента предпочтителен свайный фундамент с высоким свайным ростверком и проветриваемым подпольем, так как сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента. В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II, который реализуется за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций, а также предпостроечных мероприятий, направленных на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла. Выявлено, что пространственные фундаментные платформы являются эффективными сейсмостойкими конструкциями фундаментов на многолетнемерзлых грунтах с использованием II принципа в условиях сейсмической активности. Выполнен анализ опыта проектирования на многолетнемерзлых грунтах в сейсмически активных районах. **Практическая значимость:** Предлагается использовать I принцип строительства сейсмостойких зданий на многолетнемерзлых грунтах (в случаях, если сохранение мерзлоты возможно).

Ключевые слова: Многолетнемерзлые грунты, сейсмическая активность, свайный фундамент, ростверк, проветриваемое подполье, крупнопанельные здания.

Введение

Зона распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) занимает около 60–65 % территории России. Кроме того, часть этой зоны характеризуется сложными инженерно-геологическими

условиями в совокупности с сейсмической активностью, интенсивность которой варьируется от 6 до 10 баллов. Являясь в достаточной степени перспективными территориями с высоким потенциалом развития, а также с богатым запасом

полезных ископаемых в северной климатической зоне, значительное внимание уделяется вопросам строительства объектов различного назначения, функционирующих в рассматриваемых условиях, так как обеспечение их надежности и безопасности представляет собой достаточно сложную инженерную задачу [1].

Районы совместного распространения многолетнемерзлых пород и сейсмической активности

Зона Крайнего Севера занимает значительные территории Российской Федерации, к которым относятся: вся территория Якутии, часть городских округов Республики Коми, весь Камчатский край, северные части Красноярского и Хабаровского краев, Иркутская (частично), Сахалинская (частично), Мурманская и Магаданская области, также часть Тюменской и Архангельской областей, вся территория Ненецкого, Чукотского Ямало-Ненецкого автономных округов и некоторые районы Ханты-Мансийского автономного округа [2]. В области многолетнемерзлых пород (ММП) находится более половины сейсмоактивных районов территории России.

К таким территориям относятся:

– районы Байкальской сейсмической зоны (Иркутская и Читинская области, Республика Бурятия), характеризующиеся сейсмичностью с интенсивностью 6–10 баллов;

– районы Северной (побережье моря Лаптевых) и Южной Якутии, характеризующиеся сейсмичностью 6–9 баллов, наибольшая сейсмичность наблюдается именно в южной части Якутии, на границе с Байкальской зоной;

– прибрежные районы Тихого океана, Охотского и Берингова морей (Магаданская и Камчатская области) характеризуются сейсмичностью 6–9 баллов.

Данные районы обладают значительными залежами полезных природных ископаемых —

газа, редких металлов, нефти и угля и находятся в условиях влияния сурового климата, характеризующегося холодными зимами, коротким летом, сильными ветрами и сложными инженерно-геологическими условиями, вследствие чего особое внимание уделяется вопросам строительства объектов различного назначения в данных условиях и принципам использования ММП в качестве оснований.

Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований

В районах распространения ММП принимаются несколько принципов использования грунтов в качестве оснований [3]:

– I принцип — грунты основания сохраняются в вечномерзлом состоянии на весь период строительства и эксплуатации зданий и сооружений;

– II принцип — грунты используются в оттаявшем состоянии как при возведении объектов, так и при их эксплуатации.

Выбор принципа напрямую зависит от инженерно-геологических условий площадки строительства, конструктивных и технологических особенностей здания. При выборе принципа необходимо провести детальный анализ данных инженерно-геокриологических изысканий и произвести расчет глубины чаши оттаивания с учетом возможных деформаций основания [4].

В условиях повышенной сейсмичности района предпочтение стоит отдавать I принципу строительства согласно действующей нормативной документации — СП 25.13330, а также руководству по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах [5]. Использование данного принципа позволяет снизить расчетную сейсмичность площадки строительства, как отмечают Т. А. Белаш и Д. А. Сергеев в исследованиях [6, 7].

Реализация I принципа может выполняться различными решениями, но устройство высокого

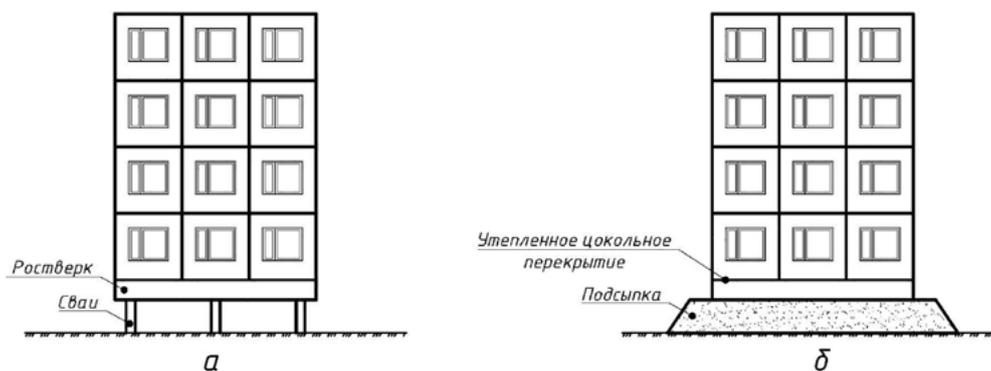


Рис. 1. Способ сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии с использованием высокого свайного ростверка с проветриваемым подпольем (а) и подсыпки (б)

свайного ростверка с проветриваемым подпольем (открытые, закрытые и с регулируемым проветриванием) для сохранения грунта в мерзлом состоянии является наиболее распространенным способом по регулированию температурного режима, влияющего на грунтовое основание.

Сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием и являются своего рода сейсмоизоляцией. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента [8].

Выявлено, что при увеличении свободной длины свай происходит увеличение периода собственных колебаний здания, что, в свою очередь, уменьшает сейсмическую нагрузку, действующую на здание, но приводит к увеличению их армирования [9]. При увеличении податливости свайного фундамента происходит рост усилий в месте сопряжения ростверка со сваями, следовательно, при сейсмических воздействиях интенсивностью более 7 баллов сейсмоизоляция в виде рассматриваемой системы может быть достигнута при внедрении в конструкцию дополнительных демпфирующих устройств, обеспечивающих достаточную податливость, или же при изменении конструкций свай, например при их исполнении в виде трубчатых элементов кольцевого сечения [10].

Помимо проветриваемого подполья, также возможно устройство подсыпок (рис. 1, б) в качестве основания, целесообразность использования которых обуславливается довольно большой мощностью пород подземного льда. Подсыпки выполняются для нешироких зданий в плане, как для отдельно стоящих, так и для групп зданий и сооружений. Материалом подсыпки выступают непучинистые грунты, чтобы при действии нагрузки от здания грунт не выветривался с отколов. Наилучшим вариантом являются крупные, средней крупности пески и крупнообломочные грунты, а также шлаки [11].

Использование пористых подсыпок может быть эффективным способом по гашению сейсмических воздействий интенсивностью не более 8 баллов, так как сама подсыпка выступает в роли сейсмоизолирующей подушки.

Возможны и комбинированные способы (рис. 2) использования подсыпок совместно с проветриваемым подпольем, системой охлаждающих труб, а также устройством сезонно-охлаждающего устройства (СОУ).

Вариант с охлаждающими трубами и СОУ используется в случаях, когда простое зимнее охлаждение через проветриваемое подполье не обеспечивает сохранение основания в мерзлом состоянии, а оттаивание грунтов удорожает строительство. Охлаждающие трубы устраиваются в подсыпке под всем зданием и объединяются кол-

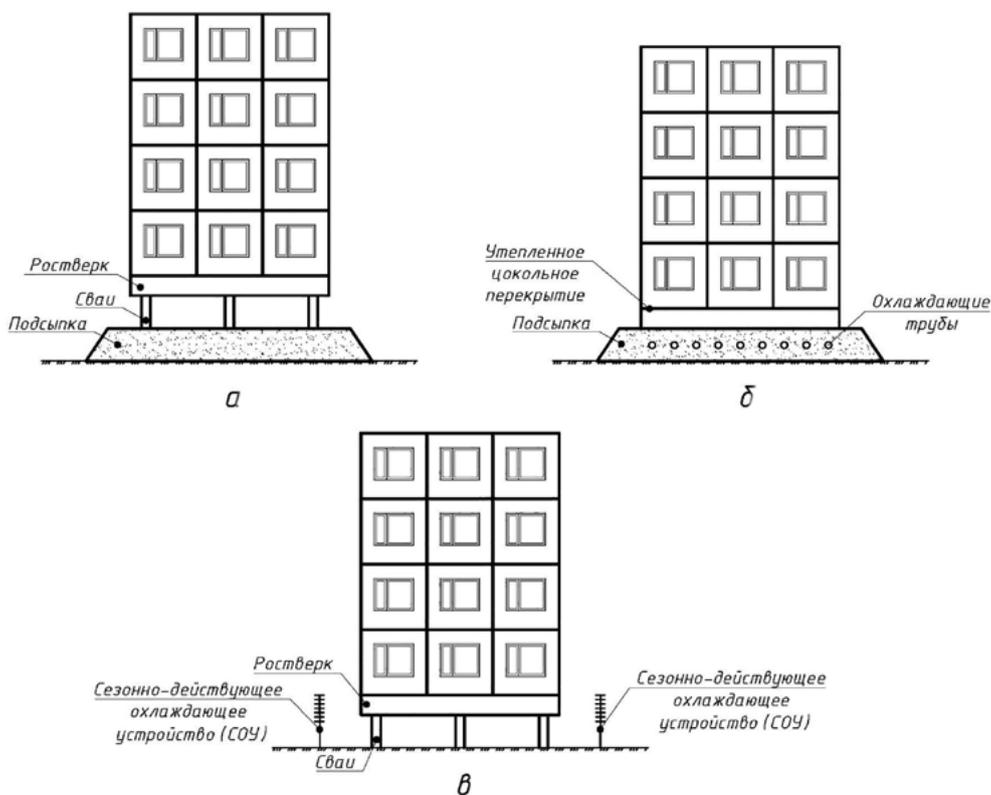


Рис. 2. Комбинированные способы сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии:

- а* — с использованием подсыпки и проветриваемого подполья;
- б* — с использованием подсыпки с охлаждающими трубами;
- в* — с использованием проветриваемого подполья и СОУ

лекторами, по которым подается хладоноситель (в жидком или газообразном состоянии).

Движение хладоносителя по трубкам может осуществляться естественным образом за счет законов физики и атмосферного давления, а также при помощи аммиачных или фреоновых холодильных установок. Допускается использовать воздушное охлаждение, но в летний период систему необходимо закрывать, иначе при попадании в трубы воды в них может произойти закупоривание в зимний период. Трубы располагают параллельно короткой части здания, с уклоном для стока воды, которая может образоваться в них при таянии инея или попадания в летнее время.

СОУ или термосифоны/термостабилизаторы используются для охлаждения пластичномерзлых и промораживания талых грунтов. Работа СОУ основана на силе тяжести и разницы тем-

ператур и заключается в переносе холодного атмосферного воздуха к грунтам основания за счет циркуляции паров от хладогента (керосин, аммиак, углекислота и др.) внутри СОУ, благодаря чему в грунтах поддерживается необходимая проектная температура. Подробно методы и технологии термостабилизации ММГ представлены в технической литературе и научных исследованиях. Например, в работах А. Р. Урманова [12], Е. С. Лихачева [13], М. Д. Константинова [14] освещены виды, особенности и методы технологии термостабилизации грунтов. В исследованиях Н. Ю. Ермиловой [15], И. И. Сахарова [16] представлены виды конструктивных решений систем термостабилизации.

В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II. Особенно он

актуален для районов, где в течение срока эксплуатации здания возможен переход грунта из мерзлого в талое состояние или наоборот [17]. Особое внимание необходимо уделять учету совместной работы надземной части и оттаивающего основания. Опасность для надземной части представляет относительная разность осадок, вызванная в результате оттаивания грунтов, в результате чего эта разность может регулироваться с помощью различных конструктивных мероприятий, например — смещение наружных фундаментов внутрь здания или обогрев грунта вокруг здания, но данные подходы требуют обязательного решения пространственных температурно-влажностных задач и задач напряженно-деформированного состояния в системе «здание — оттаивающее состояние» [18].

Обычно проект допускает неравномерную осадку здания в течение долгих лет эксплуатации, в результате чего особенно важно подготовить здание к неравномерным деформациям, поэтому фундаментные конструкции, возводимые с учетом II принципа, следует проектировать массивными и жесткими, с большим запасом прочности, способными воспринимать достаточные неравномерные осадки. К таким конструкциям могут относиться пространственные фундаментные платформы (ПФП) в различных конструктивных исполнениях [19–21]. Особенностью данных конструкций является способность воспринимать деформации, которые возникают из-за нестабильного грунта и действия сейсмической нагрузки, за счет жесткой пространственной платформы, путем жесткого соединения верхних и нижних плит с системой связей — поперечных стоек и ферм, которые придают платформе дополнительную жесткость. За счет большей площади опирания платформа имеет низкое давление на грунт, что делает ее малочувствительной к неравномерным осадкам грунта.

Данные фундаменты эффективно работают на ММГ с использованием II принципа в усло-

виях сейсмической активности, а также в слабых грунтовых условиях, что подтверждено научными исследованиями Т. А. Белаш и Т. А. Ивановой [22], А. А. Грузкова, П. Е. Соляник и Н. А. Вернина [23].

Стоит добавить, что добиться устойчивости сооружения только за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций не всегда предоставляется возможным, поэтому принимают более эффективные методы с использованием предпостроечных мероприятий (мероприятий по уменьшению деформируемости грунта основания) [24].

Предпостроечные мероприятия при II принципе направлены на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла. Для предпостроечного оттаивания грунтов можно применить естественное солнечное тепло, гидравлический метод, паро- и электроотопление [25].

Исходя из анализа и обзора вышепредставленного, авторы предлагают классификационную схему принципов использования ММГ в качестве оснований (рис. 3).

Опыт проектирования на многолетнемерзлых грунтах в сейсмически активных районах

При проектировании зданий в районах совместного распространения ММГ и сейсмичности необходимо принимать симметричные конструктивные схемы с равномерным распределением жесткостей и масс, чтобы в плане имели простую и компактную форму, а в случае достаточной протяженности — разделялись на самостоятельные отсеки антисейсмическими швами.

В данной статье опыт проектирования на ММГ в сейсмически активных районах отражен на примере жилых крупнопанельных зданий, так как

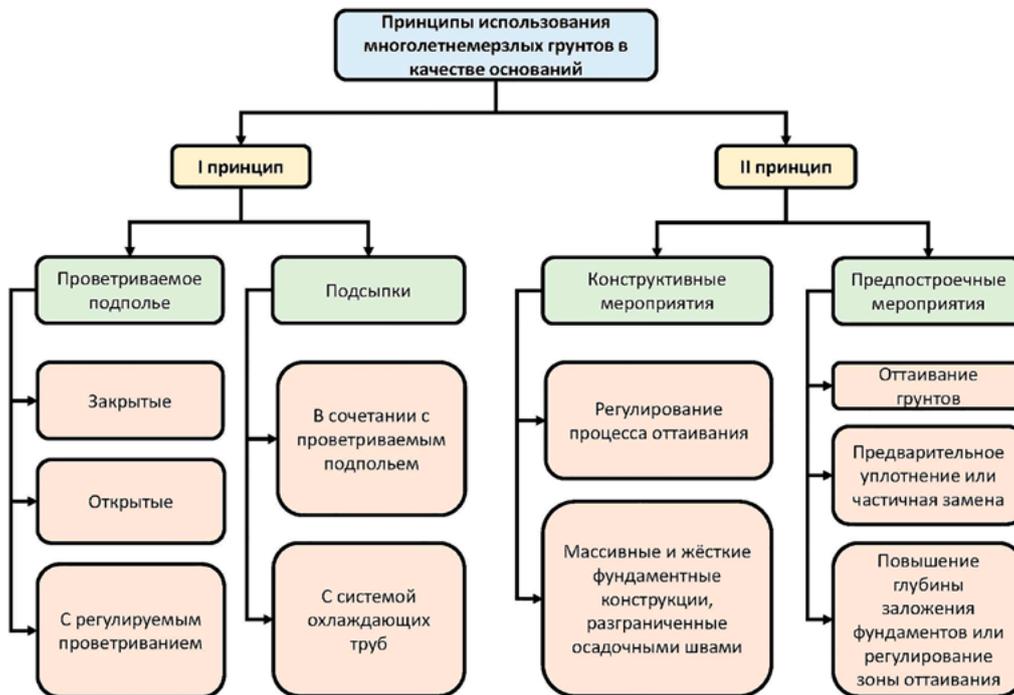


Рис. 3. Принципы использования ММГ в качестве оснований

Серии жилых крупнопанельных зданий для северных районов с сейсмической активностью

Серия и район строительства	Принцип строительства	Сейсмичность	Фундаменты
1-464ВМу, Якутск	I	7	Железобетонные сваи, ростверк монолитный, фундаменты ленточные из бетонных блоков с антисейсмическим поясом высотой 30 см
1-464АСП-1/72, Магадан	I/II	7–8	
111-122, Северобайкальск, Магадан, Тында, Нерюнгри	I	7, 8, 9	Железобетонные сваи, ростверк монолитный
	II		Пространственный рамный каркас — «гибкий этаж»
123, Магаданская область	I	до 8	Железобетонные сваи с камуфлетной пятой, ростверк монолитный
	II		

именно их в данных районах большинство. Крупнопанельные жилые здания — это здания условно «жесткой» конструкции, которые имеют стеновую (бескаркасную) конструктивную систему с продольным, поперечным или продольно-поперечным расположением несущих стен, это связано с их высоким резервом сопротивляемости к сейсмическим воздействиям, а именно [26]:

- крупнопанельные здания обладают значительной сдвиговой жесткостью;
- швы между панелями выступают в роли демпферов при сейсмических воздействиях, т. е.

смещения, возникающие вдоль швов, приводят к появлению сил трения;

- образование трещин в швах при землетрясении не приводит к мгновенной потере несущей способности, в результате чего крупнопанельные здания имеют высокий резерв к сопротивляемости к сейсмическим колебаниям, локальное разрушение одного элемента не приведет к обрушению всего здания.

Крупнопанельные здания в северной климатической зоне возводились по типовым сериям, но с некоторыми особенностями в конструктиве в



Рис. 4. Аэрофотосъемка жилых домов 122 серии в г. Северобайкальске [27, с. 25]

зависимости от принципа строительства, а также сейсмичности площадки строительства. Наиболее распространенные серии и их отличительные особенности представлены в таблице.

Серия 111-122 проектировалась специально под особые климатические и геологические особенности — наличие ММГ и высокой сейсмической активности, которыми обладал г. Северобайкальск (в дальнейшем 122 серия строилась в Магадане, Тынде, Нерюнгри). Жилые здания данной серии имеют бескаркасную конструктивную систему, а несущая способность обеспечивается за счет массивных поперечных стен, которые устанавливались с шагом 3 и 3,6 м. Для защиты дворовой части от сильных ветров они застраивались полукольцом, с ломанной формой и со скошенными торцами (рис. 4).

Для предотвращения сейсмических воздействий жилые дома 122 серии в г. Северобайкальске строили на мощном пространственном монолитном фундаменте (отметка подошвы фундамента составляет минус 4,6 м). В роли антисейсмических мероприятий предусматри-

вались системы резервных выключающихся связей, представляющие собой специальные конструктивные элементы, которые увеличивают жесткость здания до сейсмического воздействия и выключаются после достижения критической сейсмической нагрузки на здание [28].

Выключающиеся связи выполнены в виде двух контрфорсов, расположенных между зданием и фундаментом и в зоне их касания, оборудованы пакетом металлических пластин, соединенных между собой болтами или заклепками. При возникновении сейсмического воздействия нижний контрфорс начинает движение, в результате — болтовые соединения или заклепки срезаются, пластины смещаются относительно друг друга, происходит выключение связи и здание меняет периоды колебания, подстраиваясь под землетрясение. При небольших воздействиях, не приводящих к разрушению несущих элементов, возможно восстановление самовыключающихся связей и повторное использование системы.

Выключающиеся связи относятся к адаптивным системам, и помимо них в зданиях в качестве податливых элементов возможно использование и других решений систем сейсмозащиты, например — гибкий этаж, кинематические системы с качающимися опорами, пружинные гасители колебаний и демпферы различного исполнения.

Заключение

Обобщая все вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Северная климатическая зона занимает значительные территории Российской Федерации. В области распространения ММГ находится более половины сейсмоактивных районов территории России.

2. Данные районы обладают значительными залежами полезных природных ископаемых — газа, редких металлов, нефти, угля и являются в достаточной степени перспективными территориями с высоким потенциалом развития.

3. В районах распространения ММГ принимается несколько принципов использования грунтов в качестве оснований — грунты основания сохраняются в вечномерзлом состоянии на весь период строительства и эксплуатации зданий и сооружений (I принцип); грунты используются в оттаявшем состоянии как при возведении объектов, так и при их эксплуатации (II принцип).

4. В условиях повышенной сейсмичности района предпочтение стоит отдавать I принципу строительства, где в качестве фундамента оптимальным вариантом является высокий свайный ростверк с проветриваемым подпольем, так как сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента. Также при высоких сейсмических воздействиях сейсмоизо-

ляция в виде рассматриваемой системы может быть достигнута при внедрении в конструкцию дополнительных демпфирующих устройств.

5. В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II, который реализуется за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций, а также предостроенных мероприятий, направленных на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла.

6. Пространственные фундаментные платформы являются эффективными сейсмостойкими фундаментами на многолетнемерзлых грунтах с использованием II принципа в условиях сейсмической активности.

Библиографический список

1. Ivanova Z. V. Use of earthquake-proof foundations in the design of residential buildings for the areas of the northern climate zone / Z. V. Ivanova, D. S. Filimonov // E3S Web Conf. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”. — 2023. — Iss. 383. — Article № 02001. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338302001>.

2. Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2021 г. № 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера, в целях предоставления государственных гарантий и компенсаций для лиц, работающих и проживающих в этих районах и местностях, признании утраченными силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и признании не действующими на территории Российской Федерации некоторых актов Совета Министров СССР».

3. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 915/пр. — М.: Стандартинформ, 2021.
4. Майструк А. Г. Анализ конструкции фундаментов, устраиваемых на вечномерзлых грунтах / А. Г. Майструк, П. А. Пегин // Заметки ученого. — 2021. — № 9-1. — С. 31–35.
5. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах / НИИ оснований и подземных, сооружений им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1980. — С. 303.
6. Белаш Т. А. Сейсмостойкий фундамент в районах вечной мерзлоты / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2013. — № 6. — С. 40–42.
7. Белаш Т. А. Реализация принципа сейсмоизоляции в зданиях на вечномерзлых грунтах / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Жилищное строительство. — 2016. — № 1-2. — С. 47–50.
8. Гриб С. И. Проектирование свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах в сейсмических районах / С. И. Гриб // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. — 1976. — № 38.
9. Белаш Т. А. О возможности использования высокого свайного ростверка в качестве элемента сейсмоизоляции для зданий, возводимых в районах вечной мерзлоты / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2015. — № 4. — С. 45–47.
10. Belash T. A. Effects of permafrost on earthquake resistance of transport facilities in the Baikal — Amur mainline area / T. A. Belash, A. M. Uzdin // Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019 (Series: Lecture Notes in Civil Engineering, volume 49). — Vol. 1. — Singapore: Springer, 2020. — Pp. 79–95.
11. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Ю. Я. Велли, В. И. Докучаев, Н. Ф. Федорова. — Ленинград: Стройиздат, 1997. — 552 с.
12. Урманова А. Р. Технология термостабилизации грунта / А. Р. Урманова // Аллея науки. — 2018. — Т. 8 — № 4 — С. 59–63.
13. Лихачев Е. С. Методы термостабилизации вечномерзлых грунтов и разработка перспективных установок замораживания грунтов / Е. С. Лихачев, С. А. Молчанов // Академическая публицистика. — 2018. — № 10 — С. 14–19.
14. Константинов М. Д. Виды термостабилизации многолетнемерзлых грунтов и особенности их применения / М. Д. Константинов // Наука, техника и образование. — 2020. — № 4. — С. 67–71.
15. Ермилова Н. Ю. Термостабилизация многолетнемерзлых грунтов: технологии и оборудование / Н. Ю. Ермилова, А. В. Журавлев, В. Ю. Тянь // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 5 — С. 424–432.
16. Sakharov I. I. Modern approaches to the design of bases and foundations at permafrost zone sites with account for the effects of global warming / I. I. Sakharov // E3S Web Conf. International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022). — 2023. — Iss. 371. — Article №. 02031. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102031>.
17. Охлопкова Т. В. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты / Т. В. Охлопкова, Г. Р. Гурьянов, А. А. Плотников // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 4. — С. 184–196.
18. Кудрявцев С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты): книга для работников научно-исследовательских и проектных организаций, преподавателей, аспирантов и студентов строительных и транспортных вузов / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. — Санкт-Петербург: группа компаний «Геореконструкция», 2014. — 247 с.
19. Патент № 38789 Российская Федерация, МПК E04D 27/32, 27/34, 27/35. Сборная пространственная железобетонная фундаментная платформа для строительства многоэтажных зданий в особых грунтовых условиях и сейсмичности: № 2004107322/22: заявл. 11.03.2004: опубл. 10.07.2004 / Н. П. Абовский, С. Н. Абовская, В. А. Матюшенко др.; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия. — 31 с.
20. Патент № 45410 Российская Федерация, МПК E04D 27/32, 27/34, 27/35. Монолитная пространственная фундаментная платформа: № 2004135990/22: заявл.

08.12.2004: опублик. 10.05.2005 / Н. П. Абовский, В. И. Сапкалов, В. А. Сиделев; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия КрасГАСА. — 11 с.

21. Патент № 55388 Российская Федерация, МПК E04D 27/34. Пространственная железобетонная фундаментная платформа для малоэтажных зданий для строительства в особых грунтовых условиях и сейсмичности в сборном и монолитном вариантах: № 2006113951/22: заявл. 24.04.2006: опублик. 10.08.2006 / В. А. Сиделев, Н. П. Абовский, А. П. Попович и др.; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия КрасГАСА. — 13 с.

22. Belash T. A. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds / T. A. Belash, T. V. Ivanova // Magazine of civil engineering. — 2020. — Iss. 1(93). — DOI: 10.18720/MCE.93.5.

23. Грузков А. А. Пространственные платформы как эффективные и экономичные фундаменты для зданий в сложных грунтовых условиях и сейсмичности строительных площадок / А. А. Грузков, П. Е. Соляник, Н. А. Вернин // Инновации и инвестиции. — 2020. — № 5. — С. 207–211.

24. Ибрагимов Э. В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне с использованием термостабилизации грунтов: дисс. ... канд. техн. наук / Э. В. Ибрагимов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. — М., 2020. — 30 с.

25. Никитенко А. В. Устройство фундаментов в районах вечной мерзлоты / А. В. Никитенко, И. Г. Выродова //

Сборник статей международной научно-практической конференции «Экологические, инженерно-экономические, правовые и управленческие аспекты развития строительства и транспортной инфраструктуры». — 2017. — С. 183–185.

26. Белаш Т. А. Сейсмостойкие конструкции крупнопанельных зданий / Т. А. Белаш, Д. В. Зенченкова // Academia. Архитектура и строительство. — 2019. — № 3. — С. 130–137.

27. Муратова Т. Северобайкальск — ленинградский город на БАМе. Часть 1. Книга о строителях ПМК «ЛенинградБАМстрой» / Т. Муратова — М.: Издательские решения, 2020. — 472 с.

28. Филимонов Д. С. Применение сейсмоизоляции в зданиях на вечномёрзлых грунтах / Д. С. Филимонов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2022: сборник докладов Третьей Национальной научной конференции, Москва, 19 декабря 2022 года. — М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. — С. 652–657.

Дата поступления: 06.09.2023

Решение о публикации: 23.10.2023

Контактная информация:

ПЕГИН Павел Анатольевич — д-р техн. наук, доц.;
ppavel.khv@gmail.com

ФИЛИМОНОВ Даниил Сергеевич — аспирант;
daniilo.filimonov@yandex.ru

Features of Design and Construction of Buildings in Seismically Hazardous Areas with Permafrost Soils

P. A. Pegin, D. S. Filimonov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Pegin P. A., Filimonov D. S. Features of Design and Construction of Buildings in Seismically Hazardous Areas with Permafrost Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 878–890. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-878-890

Summary

Purpose: Analysis of accumulated experience in the design and construction of buildings in areas with permafrost and seismic activity. **Methods:** Statistical and analytical methods have been applied. **Results:** The areas of distribution of both permafrost soils and seismics on the territory of Russia are considered. The review and analysis of the principles of construction on permafrost soils is given. 2 main methods of preserving the foundation soils in a frozen state using principle I of construction and 3 combined options when pairing a pile foundation with a ventilated underground, filling and cooling devices are considered and analyzed. The conclusion is made about the construction using principle I, where a pile foundation with a high pile grillage and a ventilated underground is preferred as a foundation, since the piles of this foundation act as a flexible connection between the aboveground part of the building and the base. In case of seismic impact, this foundation perceives the action of vertical and horizontal seismic loads, as well as the action of the tipping moment. In the case when it is impossible to keep the foundation in a frozen state under buildings, it is necessary to use principle II, which is implemented due to the coefficient of safety and rigidity of building structures, as well as pre-construction measures aimed at thawing, pre-compaction or partial replacement of natural subsidence soils, increasing the depth of foundation laying or regulation of the thawing zone due to planning decisions or applications of devices for heat removal. It is revealed that spatial foundation platforms are effective earthquake-resistant structures of foundations on permafrost soils using principle II in conditions of seismic activity. The analysis of the design experience on permafrost soils in seismically active areas is carried out. **Practical significance:** It is proposed to use principle I of construction of earthquake-resistant buildings on permafrost soils (in cases where permafrost preservation is possible).

Keywords: Permafrost soils, seismic activity, pile foundation, grillage, ventilated underground, large-panel buildings.

References

1. Ivanova Z. V., Filimonov D. S. Use of earthquake-proof foundations in the design of residential buildings for the areas of the northern climate zone. E3S Web Conf. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”, 2023, Iss. 383, article № 02001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338302001>.

2. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16 noyabrya 2021 g. № 1946 “Ob utverzhdenii perechnya rajonov Krajnego Severa i mestnostej, priravnennyh k rajonom Krajnego Severa, v celyah predostavleniya gosudarstvennyh garantij i kompensacij dlya lic, rabotayushchih i prozhivayushchih v etih rajonah i mestnostyah, priznanii utrativshimi silu nekotoryh aktov Pravitel'stva Rossijskoj Federacii i priznanii ne dejstvuyushchimi na territorii Rossijskoj Federacii nekotoryh aktov Soveta Ministrov SSSR”* [Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2021 № 1946 “On approval of the list of regions of the Far North and localities equated to regions of the Far North, in order to provide state guarantees and compensation for persons work-

ing and living in these areas and localities, recognition as lost the force of certain acts of the Government of the Russian Federation and the recognition of certain acts of the Council of Ministers of the USSR as invalid on the territory of the Russian Federation”]. (In Russian)

3. *SP 25.13330.2020. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlyh gruntah. Utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2020 g. № 915/pr.* [SP 25.13330.2020. Foundations and foundations on permafrost soils. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 № 915/pr]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)

4. Majstruk A. G., Pegin P. A. *Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivaemyh na vechnomerzlyh gruntah* [Analysis of the construction of foundations arranged on permafrost soils]. *Zametki uchenogo* [Scientist's notes]. 2021, Iss. 9-1, pp. 31–35. (In Russian)

5. *Rukovodstvo po proektirovaniyu osnovanij i fundamentov na vechnomerzlyh gruntah* [Guidelines for the design of foundations and foundations on permafrost soils]. *III osnovanij*

i podzemnyh, sooruzhenij im. N. M. Gersevanova Gosstroya SSSR [Research Institute of Foundations and underground structures named after N. M. Gersevanov Gosstroy of the USSR]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, p. 303. (In Russian)

6. Belash T. A., Sergeev D. A. Sejsmostojkij fundament v rajonah vечноj merzloty [Earthquake-resistant foundation in permafrost areas]. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]. 2013, Iss. 6, pp. 40–42. (In Russian)

7. Belash T. A., Sergeev D. A. Realizaciya principa sejsmoizolyacii v zdaniyah na vечноmerzlyh gruntah [Implementation of the principle of seismic isolation in buildings on permafrost]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2016, Iss. 1-2, pp. 47–50. (In Russian)

8. Grib S. I. Proektirovanie svajnyh fundamentov na vечноmerzlyh gruntah v sejsmicheskikh rajonah [Design of pile foundations on permafrost soils in seismic areas]. *Stroitel'stvo v rajonah Vostochnoj Sibiri i Krajnego Severa* [Construction in the regions of Eastern Siberia and the Far North]. 1976, Iss. 38. (In Russian)

9. Belash T. A., Sergeev D. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya vysokogo svajnogo rostverka v kachestve elementa sejsmoizolyacii dlya zdaniy, vozvodimyh v rajonah vечноj merzloty [About the possibility of using a high pile grillage as an element of seismic insulation for buildings erected in permafrost areas]. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]. 2015, Iss. 4, pp. 45–47. (In Russian)

10. Belash T. A., Uzdin A. M. Effects of permafrost on earthquake resistance of transport facilities in the Baikal — Amur mainline area. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. (Series: Lecture Notes in Civil Engineering, volume 49), vol. 1. Singapore: Springer, 2020, pp. 79–95.

11. *Spravochnik po stroitel'stvu na vечноmerzlyh gruntah* [Handbook of construction on permafrost soils]. Leningrad: Stroyizdat Publ., 1997, 552 p. (In Russian)

12. Urmanova A. R. Tekhnologiya termostabilizacii grunta [Technology of thermal stabilization of the soil]. *Alleya nauki* [Alley of Science]. 2018, vol. 8, Iss. 4, pp. 59–63. (In Russian)

13. Lihachev E. S., Molchanov S. A. Metody termostabilizacii vечноmerzlyh gruntov i razrabotka perspektivnyh ustanovok zamorazhivaniya gruntov [Methods of thermal stabilization of permafrost soils and development of advanced soil freezing plants]. *Akademicheskaya publicistika* [Academic journalism]. 2018, Iss. 10, pp. 14–19. (In Russian)

14. Konstantinov M. D. Vidy termostabilizacii mnogoletnemerzlyh gruntov i osobennosti ih primeneniya [Types of thermal stabilization of permafrost soils and features of their application]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2020, Iss. 4, pp. 67–71. (In Russian)

15. Ermilova N. U., Zhuravlev A. V., Tyan V. U. Termostabilizaciya mnogoletnemerzlyh gruntov: tekhnologii i oborudovanie [Thermal stabilization of permafrost soils: technologies and equipment]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2021, Iss. 5, pp. 424–432. (In Russian)

16. Sakharov I. I. Modern approaches to the design of bases and foundations at permafrost zone sites with account for the effects of global warming. *E3S Web Conf. International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022)*, 2023, Iss. 371, article № 02031. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102031>.

17. Ohlopkova T. V., Gur'yanov G. R., Plotnikov A. A. Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vечноj merzloty [Construction and design of buildings and structures in permafrost conditions]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, Iss. 4, pp. 184–196. (In Russian)

18. Kudryavcev S. A., Saharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety): kniga dlya rabotnikov nauchno-issledovatel'skih i proektnyh organizacij, prepodavatelej, aspirantov i studentov stroitel'nyh i transportnyh vuzov* [Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations): a book for employees of research and design organizations, teachers, graduate students and students of construction and transport universities]. Saint Petersburg: gruppa kompanij “Georekonstrukciya” Publ., 2014, 247 p. (In Russian)

19. Abovsky N. P., Abovskaya S. N., Matyushenko V. A. et al. *Sbornaya prostranstvennaya zhelezobonnaya fundamentnaya platforma dlya stroitel'stva mnogoetazhnykh zdaniy v osobykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti* [Prefabricated spatial reinforced concrete foundation platform for the construction of multi-storey buildings in special ground conditions and seismicity]. Patent RF, no. 38789, 2004. (In Russian)
20. Abovsky N. P., Sapkalov V. I., Sidelev V. A. *Monolitnaya prostranstvennaya fundamentnaya platforma* [Monolithic spatial foundation platform]. Patent RF, no. 45410, 2005. (In Russian)
21. Sidelev V. A., Abovsky N. P., Popovich A. P. et al. *Prostranstvennaya zhelezobonnaya fundamentnaya platforma dlya maloetazhnykh zdaniy dlya stroitel'stva v osobykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti v sbornom i monolitnom variantakh* [Spatial reinforced concrete foundation platform for low-rise buildings for construction in special ground conditions and seismicity in prefabricated and monolithic]. Patent RF, no. 55388, 2006. (In Russian)
22. Belash T. A., Ivanova T. V. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds. *Magazine of civil engineering*, 2020, Iss. 1 (93). DOI: 10.18720/MCE.93.5.
23. Gruzkov A. A., Solyannik P. E., Vernin N. A. Prostranstvennye platformy kak effektivnye i ekonomichnye fundamenty dlya zdaniy v slozhnykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti stroitel'nykh ploshchadok [Spatial platforms as effective and economical foundations for buildings in difficult ground conditions and seismicity of construction sites]. *Innovacii i investicii* [Innovations and investments]. 2020, Iss. 5, pp. 207–211. (In Russian)
24. Ibragimov E. V. *Optimizatsiya ustroystva osnovaniy i fundamentov v kriolitozone s ispol'zovaniem termostabilizatsii gruntov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Optimization of the construction of bases and foundations in the permafrost zone using thermal stabilization of soils: diss. ...Cand. Tech. Sciences]. Moscow, 2020, 30 p. (In Russian)
25. Nikitenko A. V., Vyrodova I. G. Ustrojstvo fundamentov v rajonah vechnoj merzloty [The construction of foundations in permafrost areas]. *Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Ekologicheskie, inzhenerno-ekonomicheskie, pravovye i upravlencheskie aspekty razvitiya stroitel'stva i transportnoj infrastruktury"* [Collection of articles of the International scientific and practical Conference "Environmental, engineering, economic, legal and managerial aspects of the development of construction and transport infrastructure"]. 2017, pp. 183–185. (In Russian)
26. Belash T. A., Zenchenkova D. V. Sejsmostojkie konstrukcii krupnopanel'nykh zdaniy [Earthquake-resistant structures of large-panel buildings]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and construction]. 2019, Iss. 3, pp. 130–137. (In Russian)
27. Muratova T. *Severobajkal'sk — leningradskij gorod na BAME. CHast' 1. Kniga o stroitelyah PMK "LeningradB AMstroj"* [Severobaikalsk — Leningrad city on the Baikal-Amur mainline. Part 1. The book about the builders of PMK "Leningradbamstroy"]. Moscow: *Izdatel'skie resheniya* Publ., 2020, 472 p. (In Russian)
28. Filimonov D. S. Primenenie sejsmoizolyacii v zdaniyah na vechnomerzlykh gruntah [The use of seismic insulation in buildings on permafrost soils]. *Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya — 2022: sbornik dokladov Tret'ej Nacional'noj nauchnoj konferencii, Moskva, 19 dekabrya 2022 goda. Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet* [Actual problems of the construction industry and education — 2022: Collection of reports of the Third National Scientific Conference, Moscow, December 19, 2022. National Research Moscow State University of Civil Engineering]. Moscow, 2023, pp. 652–657. (In Russian)

Received: September 06, 2023

Accepted: October 23, 2023

Author's information:

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ppavel.khv@gmail.com

Daniil S. FILIMONOV — Postgraduate Student; daniilo.filimonov@yandex.ru