

МРНТИ 67.21.21

И.С. Бровко¹ – основной автор, ©
Ф.Х. Аубакирова², К.С. Досалиев³,
Б.К. Дуйсенбеков⁴, Г.Ж. Сыпабекова⁵



¹Д-р техн. наук, профессор, ²Канд. техн. наук, доцент, ³PhD, зав.кафедрой,
⁴PhD, профессор, ⁵Ст. преподаватель

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0003-3597-5804> ²<https://orcid.org/0000-0002-4687-1528>
³<https://orcid.org/0000-0002-5423-9231> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-3476-5218>
<https://orcid.org/0009-0003-6005-6006>



^{1,2,3,4}Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,
Шымкент, Казахстан

⁵Казахский агротехнический исследовательский университет им.

С. Сейфуллина, Астана, Казахстан



²faraub1011@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/GEWQ2137>

ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ДИНАМИЧЕСКИ РАЗЖИЖАЕМЫХ ГРУНТАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Аннотация. В статье приведены физические основы механизма разжижения грунта при сейсмических воздействиях, которые основаны на анализе мировых достижений. Выделены регионы потенциально подверженные разжижению грунта, в том числе на территории Республики Казахстан. Проанализированы геологические условия ряда объектов на территории Казахстана на предмет их сходимости с условиями строительства в префектуре Ниигата (Япония), где при разрушительном землетрясении велись натурные наблюдения, положенные в основу комплексной оценки разжижения грунта. Приведены основы метода теоретического определения потенциального разжижения грунта и их современная трактовка с учетом требований международных стандартов. Дана оценка роли: Стандартных пенетрационных испытаний SPT (Standard Penetration Test), Статического зондирования СРТ / СРТu (Cone Penetration Test) и метода «Скорость поперечной волны» V_s (Shear Wave Velocity) для реальной оценки возможности разжижения основания и необходимой в практике минимальной комбинации этих методов. Рекомендованы методы по усилению оснований и типы фундаментов для обеспечения безопасного строительства при динамическом разжижении грунтов.

Ключевые слова: геологические условия, сейсмическая нагрузка, сдвиговая волна, динамическое разжижение грунта, сопротивление грунта разжижению, пенетрация, зондирование, объемное сжатие, усиление основания, безопасное строительство.



Бровко, И.С. Основы безопасного строительства на динамически разжижаемых грунтах Республики Казахстан [Текст] / И.С. Бровко, Ф.Х. Аубакирова, К.С. Досалиев, Б.К. Дуйсенбеков, Г.Ж. Сыпабекова // *Механика и технологии / Научный журнал*. – 2026. – №2(92). – С.324-341. <https://doi.org/10.55956/GEWQ2137>

Введение. Современные требования высоких темпов возведения зданий и сооружений самого разного предназначения в зонах сейсмической активности предопределяет необходимость всестороннего изучения комбинаций статического и динамического приложения нагрузки к основаниям, что является основой для составления представлений о напряженно-деформируемом состоянии как в самих грунтах, так и в надземных конструкциях. В этом плане очень важным моментом является воздействие грунтовой дисперсной среды, в которой при землетрясениях возникает фронт сейсмических волн, вызывающий их объемное сжатие. Сейсмические воздействия характеризуются определенной цикличностью и значительной скоростью при которых фактически отсутствует возможность рассеивания порового давления. В результате чего происходит его накопление и контакт между минеральными частицами скелета грунта резко снижается. По этой причине грунт переходит в текучее состояние, что приводит к снижению его несущей способности и может вызвать очень серьезные повреждения возведенных зданий и сооружений [1-9].

Учеными разных стран [10-18] отмечается, что это крайне опасное явление, получившее название «динамическое разжижение», реализуется в полностью водонасыщенных малосвязных грунтах, и в первую очередь в песках. Следует отметить, что если полного водонасыщения не наблюдается, то увеличение порового давления будет недостаточно и вероятность возникновения динамического разжижения будет пренебрежимо мала. На настоящее время разработаны разные подходы решения этой проблемы, которые будут рассмотрены ниже.

Условия и методы исследований. Один из самых детальных анализов механизма разжижения грунтов с привязкой к реальным условиям землетрясения, выполнен японскими учеными и описан проф. К. Ишихара [10] по результатам комплексных исследований в префектуре Ниигата в пойме рек Агано и Шинано. Произошедшее сильнейшее землетрясение (магнитудой $M=7,5$) с последующим разжижением грунта привело к значительному ущербу: разрушены объекты городских построек с характерной формой потери ими устойчивости в виде кренов в сторону их центра тяжести. Более 300 зданий наклонилось на угол порядка 30 градусов и получили сейсмопросадку до 5 м [5,10]. Кроме этого, отмечено всплытие подземных коммуникаций и заглубленных емкостей, колодцев и т. д., которые переместились по вертикали на 1-2 м выше поверхности земли. Натурные обследования показали, что фундаменты разрушенных объектов не опирались на твердые грунты. Причины и механизм разжижения грунта оценивались разными методами: стандартным зондированием; испытаниями голландским конусом; отбором грунтов ненарушенной структуры ниже уровня подземных вод с последующим испытанием в приборах трехосного сжатия на циклические нагрузки. Для отбора монолитов грунта использовались грунтоносы большого диаметра и грунтонос Остерберга. По результатам испытаний на циклическую прочность было показано, что области разжижения песка имеют обширное распространение и в глубину достигли 13 м, что хорошо согласуется с перемещением поверхности грунта во время землетрясения. Значительную ценность представляют собой акселерограммы горизонтального ускорения и другие показатели, полученные в уровне подвала 4-этажного железобетонного здания во время землетрясения. Данное здание находилось на расстоянии 50 м. от площадки Кавагишичо, где здания осели или опрокинулись. Исследованиями

установлено, что основание в данном месте сложено рыхлыми песками на глубину порядка 10 м. Максимальные реальные величины ускорений, зафиксированные в направлении «восток-запад» составили – 159 м/с² и в направлении «север-юг» – 155 м/с². В [10] приведено большое количество научной информации, которая максимально полезна для прогноза последствий возможных землетрясений как в данном регионе, так и в других со сходными условиями.

Результаты исследований и обсуждение. Мировой опыт решения задач, связанных с вопросами сейсмоустойчивости строительных объектов, в том числе с учетом оценки возможного динамического разжижения грунтов оснований, свидетельствует об их большой сложности и многофакторности в зависимости от региональных геологических особенностей и специфики возводимых сооружений. Историческими наблюдениями за наиболее мощными землетрясениями выявлены регионы с высокой сейсмической опасностью. Землетрясениям подвержены огромные территории, расположенные на разных континентах. Стабильно подземные толчки на протяжении длительного времени наблюдаются вдоль всего побережья Тихого океана, в так называемом Альпийском поясе, который распространяется от Индонезии до Средиземного моря, в Северной и Южной Америке, Индии, Центральной Азии, Вьетнаме, Китае и т.д.

Подробнее остановимся на центральноазиатском регионе, его геологических и гидрогеологических особенностях с целью прогноза поведения грунтовых оснований и безаварийной эксплуатации строительных объектов. Сложные, с точки зрения их склонности к динамическому разжижению, участки залегания обводненных, малосвязных грунтов встречаются практически повсеместно. В Республике Казахстан они фрагментарно дислоцируются как в крупных городах: Алматы, Шымкент, Туркестан, Тараз, Кызылорда и т.д., так и в более мелких населенных пунктах. Актуальность данной проблемы неправомерно связывать только с городскими объектами строительства, так как в южном Казахстане на территориях пустынного и полупустынного типа, где ранее строительство велось не так активно, развивается сопутствующая инфраструктура в связи с:

- добычей полезных ископаемых – Кумкольское месторождение нефти с запасами 41 млн. тонн, расположенное в 200 км от г.Кызылорда; природного урана в Сузакском районе Туркестанской области. Данное месторождение оценивается, как одно из крупнейших в мире. Расстояние до Кызылорды напрямую составляет порядка 300 км;

- эксплуатацией особо ответственного сооружения – космодрома Байконур, расположенного в 192 км от г. Кызылорда. Площадь этого комплекса составляет 6717 кв. км. Здесь функционируют 4 стартовых и 34 технических комплекса, проложено 470 км железнодорожных, 1281 км автомобильных путей, 2784 км линий связи. Рядом расположен одноименный город;

- функционированием гидротехнических сооружений – Богенское (площадью 65 км² и объемом воды 377 млн.м³) и Шардаринское (площадью 783 км², полным объемом воды 5,7 км³) водохранилища, Коксарайский контррегулятор (с объемом воды 3 млрд.м³), а также Камбартинское и Алакское водохранилища, расположенные от г. Кызылорда на расстоянии 40-70 км.

Как видно из локации приведенных объектов, «привязка» в основном осуществлена к г. Кызылорда, где природно-геологические и сейсмологические условия сходны с префектурой Ниигата (Япония). В городе на протяжении 76 км. с юго-запада на северо-восток протекает р. Сырдарья, где уровень воды напрямую связан с обводнением прилегающих территорий. Изучив и систематизировав явления динамического разжижения грунта в этом регионе с учетом богатого фактического научного материала японских ученых в условиях реального землетрясения, полученные выводы можно будет распространить на огромные территории с аналогичными условиями, размеры которых сопоставимы с некоторыми европейскими государствами. Имеется в виду то, что на Сырдарье расположены города сопредельных государств центральной Азии: Гулистон, Худжанд (Таджикистан); Сырдарья, Бекабад (Узбекистан), а также более мелкие, по сравнению с вышеперечисленными городами Казахстана – Джусалы, Казалинск и т.д. Аналогичные условия прослеживаются в пойме судоходной реки Амударья в этом же регионе, протяженность которой 2400 км. и площадь бассейна 535 км². Также, в этом контексте, можно рассматривать г. Капшагай Алматинской области, где при оценке условий капитального ремонта автодорог 8-10 микрорайонов отмечается, что в основании на разных участках залегают пески от пылеватого до крупного. Грунтовые воды могут располагаться на глубине 0,5 м. Местами местность заболочена, что тесно связано с уровнем Капшагайского водохранилища (длина 100 км, ширина 25 км.). Сейсмичность в г. Капшагай – 8 баллов. Масштабность территорий и сложные условия строительства [19] не оставляют сомнений в необходимости исследований возможного разжижения грунта в этих сейсмически опасных зонах. Хотя до настоящего времени в перечисленных регионах случаи аварий зданий по этой причине не отмечались, но с учетом непредсказуемости и разрушительных последствий сейсмических явлений превентивные меры необходимы.

Кратко остановимся на геологических условиях данного региона по результатам работ местных изыскательских организаций и [20] по некоторым возводимым объектам, акцентируя внимание на слоях, склонных к динамическому разжижению.

*Объект 1 - «Завод»** в г. Кызылорда. Геологическими исследованиями на глубину 6,0-30,0 м. по литологическим особенностям и физико-механическим свойствам выделены следующие инженерно-геологические элементы. ИГЭ-1: слой песка пылеватого с частыми прослоями песка мелкого, вскрытой мощностью 1,20-17,0 м; ИГЭ-2: слой глины, мощностью 2,80-8,30 м; ИГЭ-3: слой суглинка мощностью 1,20-4,00 м. В перечисленном напластовании наиболее опасным, с точки зрения возможного разжижения, является песок пылеватый с частыми прослоями песка мелкого и линзами суглинка. Гранулометрический состав и физико-механические свойства этого грунта приведены ниже в табличном виде (табл. 1,2).

Таблица 1

Гранулометрический состав грунта объекта 1

ИГЭ	Фракции, мм						
	Содержание, %						
	60-10	10-2	2,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	Менее 0,05
ИГЭ-1 Песок	-	0,2	6,0	16,0	44,4	28,9	4,5

Примечание 1. Все объекты названы условно с целью соблюдения корпоративной этики.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунта объекта 1

ИГЭ	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	W , д.е.	e , д.е.	S_r , д.е.	K_f , м/сут	φ , град.	C , МПа	E , МПа
ИГЭ-1	2,67	1,67	1,50	0,149	0,787	0,409	7,898	26	0,002	18

Сейсмическая опасность зоны строительства согласно нормативных документов приведена в таблице 3.

Таблица 3

Сейсмическая опасность зоны строительства объекта 1

Населенный пункт	Интенсивность в баллах по шкале MSK-64(К) по картам сейсмического зонирования	
Кызылорда	ОСЗ - 2 ₄₇₅	ОСЗ - 2 ₂₄₇₅
	6	7

Территория завода, согласно СП РК 2.03-30-2017 (Приложение Б) находится в сейсмоопасной зоне с ускорением 0,025g, согласно карты общего сейсмического зонирования ОСЗ-1₄₇₅ и 0,051g – по карте ОСЗ-1₂₄₇₅. Участок строительства классифицируется, как потенциально подтопляемый за счет фильтрационных вод реки Сырдарья с установленным уровнем 2,2-4,0 м от поверхности земли.

Объект 2 – «Парк». Участок площадью 27,5 га, дислоцированный в г. Кызылорда, обследован с целью развития генплана. Изучение геологических данных, полученных в 2025 г. показало, что потенциально разжижаемыми слоями в данном случае являются ИГЭ-2: песок пылеватый и ИГЭ-3: песок мелкий. Эти слои по влажности находятся в диапазоне от маловлажного до водонасыщенного состояния, по плотности – рыхлые. По гранулометрическому составу и физико-механическим характеристикам имеют некоторые отличия (табл. 4, 5). Вскрытая мощность ИГЭ-2: 2,5-9,9 м, ИГЭ-3: 5,0-20,0 м.

Таблица 4

Гранулометрический состав грунта объекта 2

ИГЭ	Фракции мм					
	Содержание, %					
	60-10	10-2	2,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05
ИГЭ-2 Песок пылеватый	-	-	-	3	44	53
ИГЭ-3 Песок мелкий	-	-	1	18	67	14

Расчетные показатели при доверительной вероятности 0,85 и 0,95 представлены в таблице 5. Сейсмическая опасность зоны строительства согласно нормативных документов приведена в таблице 6.

Таблица 5

Физико-механические характеристики грунта объекта 2

ИГЭ	Ps, г/см ³	P, г/см ³	Pd, г/см ³	W, д.е.	e, д.е.	Sr, д.е.	Кф, м/сут.	φ, град.	C, КПа	E, МПа
ИГЭ-2	2,69	1,76	1,41	23,9- 27,6	0,92	0,62- 0,86	0,12-1,34	22-24	1-0	13,6
ИГЭ-3	2,68	1,63	1,44	12,4- 14,2	0,92	0,39- 0,44	2,98- 12,38	24-24	0	18,7

Таблица 6

Сейсмическая опасность зоны строительства объекта 2

Населенный пункт	Интенсивность в баллах по шкале MSK-64(К) по картам сейсмического зонирования	
Кызылорда	ОСЗ - 2 ₄₇₅	ОСЗ - 2 ₂₄₇₅
	7	8

Объект 3 – «Больница». Площадка строительства сложена тремя инженерно-геологическими элементами. ИГЭ-1: суглинок тяжелый, пылеватый мощностью 6 м, текучий. ИГЭ-2: песок мелкий средней плотности с прослоями суглинка и супеси, с глубины водонасыщенный, мощностью 22,5 м. ИГЭ-3: суглинок твердой консистенции непросадочный, толщиной 1м. Грунтовые воды вскрыты на глубине 3,0-4,2 м от поверхности земли. Источником питания является река Сырдарья, коэффициент фильтрации ИГЭ-2 составляет 5,5 м/сут. Площадка оценивается, как потенциально подтопляемая. Рассматривая основание с точки зрения потенциально возможного динамического разжижения грунта, можно сказать, что таким слоем является ИГЭ-2. Данные гранулометрического состава этого песка в первоисточнике не найдены, физико-механические характеристики приведены в таблице 7, сейсмическая опасность данной площадки в таблице 8.

Таблица 7

Физико-механические характеристики грунта объекта 3

ИГЭ	Ps, г/см ³	P, г/см ³	Pd, г/см ³	W, д.е.	e, д.е.	Sr, д.е.	Кф, м/сут	φ, град.	C, КПа	E, МПа
ИГЭ-2	-	1,92-1,89	-	-	-	-	5,5	33,1- 31,4	-	20,6

Таблица 8

Сейсмическая опасность зоны строительства объекта 3

Населенный пункт	Интенсивность в баллах по шкале MSK-64(К) по картам сейсмического зонирования	
Кызылорда	ОСЗ - 2 ₄₇₅	ОСЗ - 2 ₂₄₇₅
	7	8

На данном объекте выполнено 6 испытаний методом динамического зондирования с целью установления возможности разжижения грунта.

Объект 4 – «Капитальный ремонт улиц в г. Капишагай Алматинской области» выполнялся с целью повышения безопасности и оптимизации автомобильного движения. В ходе изысканий в основании выделено три геологических элемента. ИГЭ-1,2: пески пылеватые маловлажные; ИГЭ-3:

песок средней крупности маловлажный, с глубиной переходящий в водонасыщенное состояние; ИГЭ-4: песок крупный от маловлажного до водонасыщенного. Грунтовые воды по ряду скважин (3, 4 и т.д.) обнаружены на глубине 0,5 м. Амплитуда колебания уровня грунтовых вод зависит от наполняемости Капчагайского водохранилища. Некоторые улицы находятся в непосредственной близости от заболоченной местности. С учетом специфики дорожного строительства, к сожалению, не приводится ряд физико-механических данных по основаниям, необходимым для промышленного и гражданского строительства.

Совокупность таких признаков как: высокий уровень грунтовых вод, высокая сейсмичность района ведения работ (8 баллов), сложение оснований песчаными грунтами, характеризующимися малой связностью и невысокой плотностью ($\rho=1,60$ г/см³ для всех слоев), позволяет предположить, что основания всех этих обширных территорий при возведении строительных объектов следует оценивать на предмет их отношения к потенциально разжижаемым при динамических воздействиях.

В таких условиях на начальном этапе строительства первостепенным является вопрос выбора методики оценки разжижения грунта при сейсмических воздействиях. От того, разжижаемый это грунт или нет, зависит принятие соответствующих инженерных мероприятий, значительно влияющих на стоимость строительства. В разное время этот вопрос исследовался и нашел отражение в трудах [10-13, 15-18]. К. Ишихара [10] указывает, что основы теоретического метода оценки потенциального разжижения малосвязных грунтов заложены в трудах Идрис, Сид [11], для этого подсчитывается коэффициент запаса F_ℓ по формуле (1):

$$F_\ell = \frac{\tau_{max,\ell}/\sigma'_v}{\tau_{max}/\sigma'_v} = \frac{\tau_{av,\ell}/\sigma'_v}{\tau_{av}/\sigma'_v} \quad (1)$$

где τ_{av}/σ'_v – относительное эквивалентное напряжение для выражения прикладываемых напряжений; $\tau_{av,\ell}/\sigma'_v$ – относительное эквивалентное напряжение для выражения соответствующей прочности.

В случае, когда коэффициент F_ℓ равен или меньше единицы, то происходит динамическое разжижение, противном случае – нет.

В данном методе [10] исходят из предположения, что при землетрясении сдвиговая волна подходит снизу, вызывая горизонтальное перемещение некоторой призмы грунта высотой z . При этом максимальное касательное напряжение τ_{max} по основанию этой призмы составит

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \gamma \cdot z \cdot r_d \quad (2)$$

где a_{max} – пиковое (максимальное) значение горизонтального ускорения; γ – удельный вес грунта; g – ускорение свободного падения; r_d – коэффициент уменьшения напряжений, допускающий деформируемость грунтовой колонны, величина которой меньше единицы.

Этот важный параметр r_d Сид и Идрисс в [12] приводят в графической форме. Ивасаки [11], преобразовав (2), рекомендовал использовать эмпирическую формулу

$$\frac{\tau_{max}}{g} = \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (3)$$

где $\sigma_v = \gamma \cdot z$ – полное вертикальное напряжение; σ'_v – поровое давление.

Посредством уравнения (3) возможно определение касательных напряжений в горизонтальной плоскости толщи грунта, вызванного сейсмической нагрузкой, исходя из горизонтального ускорения, которое может быть замерено на поверхности. Несмотря на дальнейшие корректировки и вносимые уточнения, методика оценки разжижения грунта успешно используется вплоть до настоящего времени, особенно для предварительных расчетов. Приведенные формулы являются классическим инструментом, необходимым для определения вертикальной осадки грунтовой поверхности после того, как установлен факт возможности разжижения грунта. Концепция, изложенная в [10], в целом сводится к следующему: предложен эмпирический метод вертикального перемещения слоя разжижаемого грунта, базирующегося на результатах статического зондирования (СРТ), которые коррелируются с объемной деформацией сдвига (γ_v). Испытания СРТ проводят по всей требуемой толщине основания, что отражает плотность (жесткость) грунта в естественном состоянии. Для оценки разжижения грунта также необходимы: наибольшее горизонтальное ускорение a_{\max} на данной строительной площадке и магнитуда землетрясения M_w , а так же геостатическое давление. По действующим картам сейсмического районирования a_{\max} и M_w можно определить для данного района строительства. Геостатическое давление обусловлено полным вертикальным и поровым давлением. При этом, M_w и a_{\max} – это характеристики землетрясения, а геостатическое давление отражает внутреннее состояние грунтового массива. Совместный учет этих факторов позволяет оценить: а) меру разжижаемости (методика описана выше); б) величину осадки слоя грунта, которая находится следующим образом

$$S = \int \varepsilon_v dz \approx \int \gamma_v / 3 dz \quad (4)$$

где: S – полная вертикальная осадка после землетрясения; ε_v – вертикальная деформация (осадка) элементарного слоя грунта; γ_v – объёмная сдвиговая деформация, рассчитывается по формуле (5); dz – элементарная толщина слоя.

В приведенной формуле (4) представлена зависимость интегральной осадки от распределения сдвиговых деформаций по глубине. Это определяющий момент теории К. Ишихара. Из него следует, что общая осадка поверхности суммируется из деформаций элементарных слоев в пределах сжимаемой толщи. Для связи объемной сдвиговой деформации (γ_v), являющейся мерой интенсивности циклового воздействия с вертикальной осадкой (ε_v) используется геометрическое соотношение для условий простого сдвига в приборе трехосного сжатия. Это приближение позволяет перейти от сдвиговой деформации к интересующей нас вертикальной осадке.

Ключевым моментом данного метода [10] является определение объемной сдвиговой деформации γ_v :

$$\gamma_v = 1/50 \tau_{\max} q_c (1 - \tau_{\max} / \tau_f) \quad (5)$$

где: q_c – сопротивление конуса в условиях статического зондирования (СРТ), по данным полевых испытаний; τ_{\max} – максимальное касательное напряжение, вызванное землетрясением, определяемое по следующей формуле

$$\tau_{\max} = 0,65 \cdot (a_{\max} / g) \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d \quad (6)$$

где: τ_f – статическая прочность грунта на недренированный сдвиг; σ_{v0} – суммарное вертикальное напряжение от веса вышележащих грунтов на глубине z ; r_d – коэффициент уменьшения касательных напряжений с учетом изменчивости и глубины грунта (≤ 1.0).

Основные концепции расчета, предложенные К. Исихара [10] в современных условиях получили дальнейшее развитие на основе применения более сложных моделей, смысл которых изложен в работах [16,17]. Они так же базируются на данных СРТ, но с добавлением большего количества факторов.

Следует отметить, что определение основных параметров теории разжижения грунта постоянно совершенствуется, в него вносятся уточняющие данные, включенные в новые нормативные документы. Реальная ситуация выглядит следующим образом: в Казахстане в данное время используются Нормы технологического проектирования сейсмостойких объектов (НТП РК 08-01.1-2017), которые в соответствии с «Дорожной картой по внедрению ЕСК РК», утвержденной Комитетом по делам строительства и ЖКХ МИИР РК в 2026 г. будут заменены актуализированной редакцией, реализованной в ЕСК РК (Единых строительных правилах Республики Казахстан). Этот новый нормативный документ РК гармонизирован с международными стандартами, в первую очередь, с Еврокодом 8 (EN 1998-5:2004 «Design of structures for earthquake resistance. Foundations, retaining structures and geotechnical aspects»), отчетом Национального центра исследований землетрясений США NCEER (Youd et al., 2001, 2015) и стандартами ASCE/SEI.

Рекомендуемый в этих нормативах метод считается упрощенным и заключается в сравнении циклического сопротивления грунта разжижению (CRR) с сейсмической нагрузкой, выраженной через циклическое касательное напряжение (CSR). Разжижение считается возможным, если:

$$CSR > CRR \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \cdot K_{\alpha} \cdot K_{DR} \quad (7)$$

где определение CSR основано на упрощенной процедуре, предложенной в [12], и развитой в современных рекомендациях [18].

$$CSR = 0,65 (a_{\max} / g) (\sigma_{v0} / \sigma'_{v0}) \cdot r_d \quad (8)$$

где: 0.65 – эмпирический коэффициент редукции, который учитывает цикличность пикового напряжения; a_{\max} – максимальная величина горизонтального ускорения на поверхности грунта; g – ускорение свободного падения.

На практике базовая величина CSR корректируется в зависимости от особенностей региональных условий путем добавления ряда новых коэффициентов:

MSF- коэффициент приведения к реальной магнитуде землетрясения M_w ;

K_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние высокого эффективного напряжения (на большой глубине) на сопротивление разжижению;

K_{α} – коэффициент, учитывающий наклон поверхности или начальные статические касательные напряжения в грунте (например, в откосах).

CRR определяется по данным стандартных пенетрационных испытаний (SPT, CPT, V_s), корректируется на содержание мелких частиц (FC). K_{DR} является коэффициентом относительной плотности, в расчетах он часто опускается, так как плотность уже является основным параметром в CRR.

Ключевыми методами, которые позволяют оценить важнейший параметр - циклическое сопротивление разжижению (CRR), являются:

А) SPT – стандартное пенетрационное испытание осуществляемое посредством определения сопротивления, которое оказывает грунт погружению ударами молота пробоотборника. Предварительно на требуемую глубину пробуривается скважина, на дно которой погружают стандартный пробоотборник. По замеряемому количеству ударов для погружения пробоотборника на 30 см. получают, так называемое «сырое NSPT», значение которое в дальнейшем требуют корректировки из-за применяемого типа оборудования, в частности энергии удара молота. Для этого производится приведение к стандартной энергии и эффективному напряжению путем несложных математических преобразований. Метод SPT можно характеризовать, как самый распространенный ввиду его относительной дешевизны, незначительной трудоемкости, высокой мобильности в пределах строительной площадки, что позволило накопить по отдельным регионам исчерпывающую базу данных. К его недостаткам относится значительная дисперсия получаемых результатов и недостаточно точная детализация по глубине.

Б) CPT / CPTu – статическое зондирование, которое осуществляется посредством непрерывного вдавливания в исследуемой точке электронного зонда с наконечником в виде конуса стандартных размеров. В процессе испытаний, которые считаются относительно быстрыми, строится достаточно детальный геологический профиль основания с возможностью измерения порового давления (CPTu).

Для оценки разжижения (q_{c1N})_{CS} необходимы замеры следующих параметров: q_c - общее сопротивление конуса, f_s - сопротивление трения на муфте, u - поровое давление (в случае CPTu). Далее посредством корректировки полученных результатов зондирования на: нормирование на напряжение, на тип грунта (индекс поведения грунта I_c), приведение к «чистому» песку (q_{c1N})_{CS} посредством эмпирических кривых [15,17], определяют CRR_{7.5}. В качестве недостатков этого метода отмечают, что он дороже SPT, отсутствует возможность визуализации испытанных образцов грунта и осложняется интерпретация полученных результатов в слоистых (неоднородных) основаниях.

В) V_s - скорость поперечной волны. Этот метод, основанный на замере скорости распространения поперечных (сдвиговых) волн в грунтовой массе, напрямую характеризует его жесткость. Последующая, после замера скорости, корректировка на нормирование на напряжение и на содержание мелких частиц и использование эмпирических кривых (Andrus & Stokoe), позволяют получить искомое значение CRR_{7.5}.

В практике строительства, особенно на начальных этапах, наиболее часто используется SPT, как наиболее доступный и простой метод с возможностью получения образцов грунта с разной глубины основания для детальных визуальных и лабораторных исследований, в том числе и определения гранулометрического состава. Однако, для ответственных сооружений, в силу вышеизложенных причин, одного этого или любого другого отдельно взятого метода недостаточно. Поэтому, для повышения

надежности определения риска разжижения необходима комбинация из не менее двух независимых методов (например, СРТ+SPT или СРТ+V_s), выбор которых может быть осуществлен в соответствии с таблицей 9.

Таблица 9

Методы измерений и их основные параметры

Метод	Измеряемая величина	Основной параметр	Детальность	Главное преимущество
SPT	Ударное сопротивление	(N ₁) ₆₀	Точечная, через 1-1.5 м	Большая база данных, простота
СРТ / СРТu	Непрерывность по глубине	(q _{c1N}) _{CS}	Высокая	Объективность, поровое давление
V _s	Скорость упругой волны	V _{s1}	Точечная или усредненная	Прямая связь с динамическими свойствами

Далее остановимся на изменениях в подходах к вопросу оценки разжижения грунта при переходе от действующих в Казахстане норм (НТП РК) к ЕСК РК (2026 г.). В НТП РК метод SPT принимается как основной, а роль СРТ и V_s оценивается как второстепенная. В новой трактовке, согласно ЕСК РК, SPT продолжает оставаться одним из основных методов, но применяемое оборудование подвергнется строгой регламентации в части калибровке энергии (ERM, Energy Ratio Measurement) с обязательными корректировками: на энергию (до N₆₀), на эффективное напряжение (до (N₁)₆₀) и на содержание мелких частиц (FC). Для получения CRR по (N₁)₆₀ станет необходимым использование единых формул и корреляционных кривых. Испытания СРТ/СРТu получают статус равноценных с SPT, а иногда и предпочтительных.

Скорость поперечной волны V_s трактуется как самостоятельный метод. В этом состоит его основное достоинство.

Анализ состояния вопроса безопасного ведения строительства на грунтах, склонных к динамическому разжижению при циклических нагрузках, свидетельствует о необходимости соблюдения объективных требований правильности оценки этого явления и применения методов подготовки оснований и устройства хорошо адаптированных типов фундаментов в таких условиях. Предшествующий научный и производственный опыт показывает, что при устройстве подземных конструкций зданий и сооружений для достижения полной безопасности нельзя ограничиваться только одним, даже очень хорошим методом фундаментирования. Необходим комплексный подход, состоящий из двух стратегий: 1) усиление грунта для его стабилизации; 2) устройство фундаментов, обеспечивающих необходимую несущую способность в пределах допустимых деформаций оснований с учетом фактора динамического разжижения грунта. В настоящее время известно много вариантов как по усилению оснований, так и по методам устройства фундаментов, среди которых по адекватному инженерному анализу для конкретных условий строительства необходима соответствующая оптимальная комбинация из подходящих строительных технологий.

Кратко остановимся на методах, наиболее приемлемых к рассматриваемому случаю, в части усиления оснований.

1. Глубинное виброуплотнение. Направлено на достижение такого состояния водонасыщенных песков, при котором они теряют способность к разжижению (до достижения относительной плотности $D_r > 75-80\%$). Такого результата можно добиться: а) методом виброфлотации, который предусматривает погружение вибратора с одновременным подмывом нижележащего основания. Технология наиболее эффективна для чистых песков; б) уплотнение виброкатком. Характеризуется как наиболее экологичный подход; в) глубинное виброуплотнение может осуществляться попеременным погружением и вытаскиванием вибробулав. Этот способ дает наибольшее проникновение в глубину уплотняемого массива. Или ударами по поверхности грунта тяжелыми трамбовками, сбрасываемыми с достаточной высоты, которые наиболее эффективны при уплотнении больших производственных площадей. Перечисленные методы позволяют достичь высокой надежности, но требуют подтверждения качества производства работ.

2. Цементация применяется как метод создания армирующих конструкций в разжижаемом грунте. Чаще всего это вертикальные или наклонные элементы, которые способны воспринимать нагрузку от вышерасположенных конструкций зданий или сооружений и передавать ее на более прочные нижерасположенные основания. При этом деформации создаваемого комбинированного основания, по сравнению с первоначальным состоянием природного грунта, значительно уменьшаются. Чаще всего для этого используются следующие технологии: а) струйная цементация, где используется высоконапорная струя воды для разработки скважины в грунте с последующим заполнением ее твердеющим цементно-песчаным раствором. Отмечается высокая эффективность, но, вместе с тем дороговизна; б) устройство грунтоцементных опор, основной особенностью которой является использование местного грунта в качестве заполнителя, при перемешивании его с цементом и водой (или без воды) непосредственно на месте устройства. Этот метод расценивается прежде всего как метод армирования грунтов вертикальными цилиндрическими элементами с повышенными строительными качествами; в) устройство каменных столбов в грунте. Достигается за счет замены слабого грунта щебнем или гравием. Отличается возможностью обеспечения дренажа, что положительно при возможном динамическом разжижении.

3. Дренаживание. Позволяет предотвратить повышение давления поровой воды при землетрясениях путем ее ускоренного отвода. Дрены могут быть изготовлены из разных материалов, например, песка, щебня, гравия, композитных материалов и т.д. Они наиболее эффективны при низкой скорости нагружения оснований. Необходим расчет времени на основе теории фильтрационной консолидации.

4. Устройство искусственных грунтовых подушек. Служит заменой природным разжижаемым грунтам и предпринимается как компенсационная мера по снижению деформаций основания и удалению лишней воды при сейсмических воздействиях. Эффективно при наличии на близком расстоянии от строительного объекта альтернативного вида грунта взамен природному. Требуется послойное уплотнение с подтверждением качества выполненных работ.

По части выбора типа фундамента на разжижаемых грунтах можно отметить следующее. Этот аспект выходит на первое место, когда усиление грунта по каким-либо причинам неосуществимо или экономически

невыгодно. В результате анализа существующего опыта установлено, что наиболее надежными проявили себя фундаменты а) глубокого заложения, б) плитные конструкции и в) фундаменты, обеспечивающие сейсмоизоляцию зданий.

А) Свайные фундаменты, относимые к типу фундаментов глубокого заложения, кроме своей обычной функции передавать нагрузку на глубоко расположенные малосжимаемые или несжимаемые породы, в разжижаемых грунтах должны учитывать боковое растекание. Оно выражается не только в потери части сопротивления по боковой поверхности в разжиженном слое, но и в дополнительных нагрузках, таких как: горизонтальное давление, аналогичное, как от тяжелой жидкости; отрицательное трение от сейсмопросадки; и изгибающих моментных нагрузок, вызванных поперечными подвижками разжижающегося грунта, требующие повышенного армирования.

Б) Плитные фундаменты значительной жесткости. Сооружаются под всем зданием сразу и приводят к эффекту «Плита-мат». Аналогично плавающему плоту, такая конструкция частично гасит нагрузки и перераспределяет (сглаживает) неравномерные деформации основания. Тем самым улучшая пространственную устойчивость зданий. Обязательным условием применения такой конструкции фундамента является точный расчет с условием, что ожидаемые осадки и их перепады не приведут к критическим напряжениям в конструкциях.

В) Сейсмоизолирующие фундаменты. Включают в себя специально разработанные узлы (пружинного типа, резино-стальные сейсмопротекторы и т.д.), обеспечивающие полное или частичное разделение работы фундаментов и надземных конструкций зданий при сейсмических нагрузках. Подтверждают свою высокую надежность, но являются дорогими, как в устройстве, так и в проектировании. Зачастую необходимы специальные материалы из специальных марок стали, резины и т.д.

Резюмируя, приведем некоторые критерии выбора рационального метода устройства фундаментной части зданий и применяемые комбинации «усиление основание - рациональный тип фундамента» исходя из мировой практики строительства на разжижаемых грунтах:

- при глубине разжижаемого слоя 5-7 м эффективно его уплотнение. При больших глубинах - цементация и сваи;

- большая чувствительность конструкции строительного объекта к деформациям вызывает необходимость более строгих методов решения. То же самое можно констатировать и по уровню сейсмичности площадки строительства;

- применение дренирования становится мало эффективным по мере возрастания гидравлического градиента в потоке подземных вод;

- экономическая целесообразность применяемых геотехнологий существенно зависит от наличия спецтехники, отработанности технологических операций и адаптированности к местным условиям строительства.

Для ответственных сооружений (АЭС, высотные здания, торговые или больничные комплексы и т.д.) необходима максимальная надежность, которая обеспечивается следующей комбинацией, называемой «золотой стандарт»: усиление основания цементацией (Jet Grouting или Deep Soil Mixing) - глубокие сваи - жесткая ростверковая плита. Для объектов промышленного или гражданского назначения, располагаемых на больших

площадях рациональным и надежным решением будет сочетание виброуплотнения или каменных опор с плитным фундаментом. Для мостов, эстакад, портовых сооружений - глубокие сваи, рассчитанные на боковое давление и просадку, с усиленным армированием в зоне возможного разжижения.

Заключение. Опытном многочисленных исследований, проведенных в разных частях земного шара с высокой и повторяющейся сейсмической активностью, установлено, что в водонасыщенных грунтах, характеризующихся малой связностью, возникает опасное для строительных объектов явление – разжижение, при котором грунт переходит в более текучее состояние, что может вызвать серьезные повреждения возведенных зданий и сооружений.

При одном из катастрофических землетрясений магнитудой $M=7,5$, произошедшего в префектуре Ниигата (Япония), непосредственно в зоне разрушений были проведены ряд натурных измерений, в частности - акселерограммы горизонтального ускорения, зафиксированы максимальные реальные величины ускорений по направлениям, отобраны образцы грунта с последующим испытанием их в приборах трехосного сжатия и т.д. То есть получен богатый фактический материал, который лег в основу создания обоснованной научной теории, которая максимально полезна для прогноза и последствий возможных землетрясений и возведения сейсмостойких строений, как в данном регионе, так и в других, со сходными условиями.

На основании анализа геологических, гидрогеологических и сейсмических условий строительства ряда новых и эксплуатации возведенных объектов, в том числе повышенной ответственности, в Казахстане выделены регионы, потенциально подверженные динамическому разжижению грунта. Масштабность территорий и сложные условия строительства не оставляют сомнений в необходимости учета возможного разжижения грунта в этих сейсмически опасных зонах.

Очень важную роль играет точная, объективно обоснованная оценка склонности исследуемого грунта к динамическому разжижению, так как от этого напрямую зависят технико-экономические показатели принимаемых проектных решений. В связи с этим дается современная, с учетом требований международных стандартов, трактовка метода оценки разжижаемости грунта, базирующаяся на сравнении циклического сопротивления грунта разжижению (CRR) с сейсмической нагрузкой, выраженной через циклическое касательное напряжение (CSR). В случае доминирования CRR, разжижение считается возможным.

Показано, что для повышения надежности определения риска разжижения необходима комбинация не менее двух независимых методов (например, CPT+SPT или CPT+V_s), исходя из имеющегося в наличии оборудования и наработанного опыта этих измерений.

В зависимости от уровня ответственности возводимых зданий и сооружений рекомендованы методы по усилению оснований и типы фундаментов для обеспечения безопасного строительства при динамическом разжижении грунтов, исходя из анализа местных условий строительства и учета мирового опыта.

Список литературы

1. Иванов, П.Л. Разжижение песчаных грунтов [Текст] / П.Л. Иванов - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 260 с.

2. Маслов, Н.М. Основы инженерной геологии и механика грунтов [Текст] / Н.М. Маслов - М.: Высшая школа, 1982. - 511 с.
3. Ставницер, Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов [Текст]: монография / Л.Р. Ставницер - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. - 448 с.
4. Вознесенский, Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов [Текст]: дис. докт. геол.-минер. наук: 04.00.07 / Вознесенский Евгений Арнольдович. - М., 2000. - 368с.
5. Расулов Х.З. Сейсмопрочность и сейсмопросадка увлажненных лессов [Текст] / Х.З. Расулов - Ташкент: Издательство академии наук Республики Узбекистан, 2020. - 322с.
6. Минаев, О.П. Об оценке разжижения грунтов оснований фундаментов зданий [Текст] / О.П. Минаев, А.Ж. Жусупбеков // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2025. - С.73-94.
7. Моргунов, К.П. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений [Текст] / К.П. Моргунов, М.А. Колосов // Наука и техника. - 2022. - Т.21. - № 3. - С. 201–210.
8. Болдырев, Г.Г. Методы определения динамических свойств грунтов [Текст] / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов - М.: ООО «Прондо», 2018. - 488 с.
9. Штейнберг, В.В. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) [Текст] / В.В. Штейнберг, М.В. Сакс, Ф.Ф. Аптикаев и др. // Вопросы инженерной сейсмологии. -1993. - Вып. 34. - С.5–94.
10. Ишихара, К. Поведение грунтов при землетрясениях [Текст] / К. Ишихара - М.: Недра, 2005. - 384с.
11. Iwasaki T., Tatsuoка F., Tokida K. & Yasuda S. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan // Proc. 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, 1978. PP. 885-896.
12. Seed H.B. & Idriss I.M. Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential // Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1971. Vol. 97. SM9. PP. 1249-1273.
13. Idriss, I.M., Boulanger, R.W. Soil liquefaction during earthquakes. - USA, California: EERI, 2008. - 240p.
14. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Monograph. - USA, Oxford, Clarendon Press: Department of Civil Engineering Science, University of Tokyo, 2006. - 384p.
15. Robertson, P.K. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test [Text] / P.K. Robertson & C.E. Wride (Fear) // Canadian Geotechnical Journal. - 1998. - 35(3). - PP 442-459.
16. Zhang, G. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground [Text] / G. Zhang, P.K. Robertson, & R.W. Brachman // Canadian Geotechnical Journal. - 2002. - Vol. 39. - Issue 5. - PP. 1168–1180.
17. Boulanger, R.W. Evaluation of cyclic softening in silts and clays [Text] / R.W. Boulanger & I.M. Idriss // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. - 2007. - Vol.133. - Issue 6. - PP.641–652.
18. Youd, T.L. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils [Text] / T.L. Youd, I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian & all // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. - 2001. - 127(4). - PP.297-313.
19. Инфраструктура объектов хозяйственной деятельности, расположенных на территориях в районе г. Кызылорда. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.petrokazakhstan.kz>. Дата обращения 25.03.26.
20. Инженерно-геологические данные грунтовых условий г. Кызылорда. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://geology.gov.kz/>, <https://www.gov.kz/memleket/entities/geology>. Дата обращения 27.03.26.

Материал поступил в редакцию 21.04.26, принят 23.06.26.

И.С. Бровко¹, Ф.Х. Аубакирова¹, К.С. Досалиев¹,
Б.К. Дуйсенбеков¹, Г.Ж. Сыпабекова²

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университет,
Астана, Қазақстан

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ ДИНАМИКАЛЫҚ СҰЙЫЛТЫЛҒАН ТОПЫРАҚТАРДАҒЫ ҚАУІПСІЗ ҚҰРЫЛЫС НЕГІЗДЕРІ

Аңдатпа. Мақалада әлемдік жетістіктерді талдауға негізделген сейсмикалық әсерлер кезіндегі топырақтың сұйылту механизмінің физикалық принциптері ұсынылған. Топырақтың сұйылтылуына бейім аймақтар анықталды, соның ішінде Қазақстан Республикасындағы аудандар да бар. Қазақстандағы бірқатар учаскелердің геологиялық жағдайлары Ниигата префектурасындағы (Жапония) құрылыс жағдайларына ұқсастығы бойынша талданды. Онда топырақтың сұйылтылуын кешенді бағалаудың негізін құраған жойқын жер сілкінісі кезінде нақты жағдайдағы бақылаулар жүргізілді. Мақалада топырақтың сұйылтылуының ықтималдығын теориялық анықтау әдісінің негіздері және оны халықаралық стандарттардың талаптарын ескере отырып, заманауи түсіндіру ұсынылған. Топырақтың сұйылту мүмкіндігін шынайы бағалаудағы стандартты ену сынағының SPT (Standard Penetration Test), конус ену сынағының CPT/CPTu (Cone Penetration Test) және «Ығысу толқынының жылдамдығы» Vs (Shear Wave Velocity) әдісінің рөлі, сондай-ақ іс жүзінде қажетті осы әдістердің минималды үйлесімі бағаланады. Топырақтың динамикалық сұйылту кезінде қауіпсіз құрылысты қамтамасыз ету үшін іргетас нығайту әдістері мен іргетас түрлері ұсынылады.

Тірек сөздер: геологиялық жағдайлар, сейсмикалық жүктеме, ығысу толқыны, топырақтың динамикалық сұйылтылуы, топырақтың сұйылтуға кедергісі, ену, зондтау, көлемдік сығу, іргетастың нығайтылуы, қауіпсіз құрылыс.

I.S. Brovko¹, F.Kh. Aubakirova¹, K.S. Dosaliev¹,
B.K. Duissenbekov¹, G.Zh. Syrabekova²

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

FUNDAMENTALS OF SAFE CONSTRUCTION ON DYNAMICALLY LIQUEFIABLE SOILS IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Abstract. The paper presents the physical fundamentals of the soil liquefaction mechanism under seismic loading, based on an analysis of global research and best practices. Regions potentially susceptible to soil liquefaction are identified, including those within the Republic of Kazakhstan. The geological conditions of a number of sites in Kazakhstan are analyzed in terms of their similarity to construction conditions in Niigata Prefecture (Japan), where in-situ observations during a destructive earthquake formed the basis for a comprehensive assessment of soil liquefaction.

The principles of theoretical evaluation of liquefaction potential are outlined, along with their modern interpretation in accordance with international standards. The role of Standard Penetration Tests (SPT), Cone Penetration Tests (CPT/CPTu), and the Shear Wave Velocity (Vs) method in the reliable assessment of liquefaction susceptibility is evaluated, including the minimum practical combination of these methods. Methods for ground

improvement and types of foundations are recommended to ensure safe construction under conditions of dynamic soil liquefaction.

Keywords: geological conditions, seismic loading, shear wave, dynamic soil liquefaction, soil resistance to liquefaction, penetration, site investigation (sounding), volumetric compression, ground improvement, safe construction.

References

1. Ivanov P.L. Razzhizhenie peschanyh gruntov [Liquefaction of sandy soils] - M.-L.: Gosjenergoizdat, 1962. – 260s. [in Russian]
2. Maslov N.M. Osnovy inzhenernoj geologii i mehanika gruntov [Fundamentals of engineering geology and soil mechanics] - M.: Vysshaja shkola, 1982. - 511s. [in Russian]
3. Stavnicer L.R. Cejsmostojkost' osnovanij i fundamentov [Earthquake resistance of foundations and foundations] / Monografija. M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2010. - 448s. [in Russian]
4. Voznesenskij E.A. Dinamicheskaja neustojchivost' gruntov [Dynamic instability of soils]. Diss. na soisk. uch. ct. d.g-m.n. - M, 2000, - 368s. [in Russian]
5. Rasulov H.Z. Sejsmoprochnost' i sejsmoprosadka uvlazhnennyh lessov [Seismic resistance and seismic subsidence of moistened loess] – Tashkent: Izdatel'stvo akademii nauk Respubliki Uzbekistan, 2020. - 322s. [in Russian]
6. Minaev O.P., Zhusupbekov A.Zh. Ob ocenke razzhizhenija gruntov osnovanij fundamentov zdaniy [On the assessment of soil liquefaction of the foundations of buildings] // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij [Earthquake-resistant construction. Safety of structures], 2025. – S.73-94. [in Russian]
7. Morgunov K.P., Kolosov M. A. Problemy razzhizhenija gruntov v osnovanijah gidrotehnicheskix sooruzhenij [Problems of soil liquefaction in the foundations of hydraulic structures] // Nauka i tehnika [Science and technology], 2022. - T.21. - № 3. - S. 201–210. [in Russian]
8. Boldyrev G.G., Idrisov I.H. Metody opredelenija dinamicheskix svojstv gruntov [Methods for determining the dynamic properties of soils]. - M.: OOO «Prondo», 2018. - 488s. [in Russian]
9. Shtejnberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. i dr. Metody ocenki sejsmicheskix vozdeystvij (posobie) [Methods of seismic impact assessment (manual)] // Voprosy inzhenernoj sejsmologii [Questions of engineering seismology] – M.: Nauka, 1993 - Vyp. 34. - S.5–94.
10. Ishihara K. Povedenie gruntov pri zemletrjasenijah. (perevod 2 anglijskogo izdanija Pod redakciej A.B. Fadeeva i M.B. Lisjuk.) [Soil behavior during earthquakes] – M.: Nedra, 2005. -384s.
11. Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K. & Yasuda S. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan /Proc. 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, 1978. - PP. 885-896.
12. Seed H.B. & Idriss I.M. Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential / Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1971. - Vol. 97. - SM9. - PP. 1249-1273.
13. Idriss I.M., Boulanger R.W. Soil liquefaction during earthquakes. USA, California: EERI, 2008. - 240p.
14. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Monograph. USA, Oxford, Clarendon Press: Department of Civil Engineering Science, University of Tokyo, 2006. - 384p.
15. Robertson P.K. & Wride (Fear) C.E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test / Canadian Geotechnical Journal, 1998. - 35(3). - 442-459.

16. Zhang G., Robertson P.K., & Brachman R.W. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground / Canadian Geotechnical Journal, 2002. – Vol. 39. - Issue 5. - PP. 1168–1180.
17. Boulanger R.W. & Idriss I.M. Evaluation of cyclic softening in silts and clays / Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007. – Vol.133. - Issue 6. - PP.641–652.
18. Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T. & all Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils / Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001. - 127(4). - 297-313.
19. Инфраструктура объектов хозяйственной деятельности, расположенных на территориях в районе г. Кызылорда [The infrastructure of business facilities located in the territories of the city of Kyzylorda] [Electronic resource]. -- Access mode: <https://www.petrokazakhstan.kz> [in Russian]
20. Инженерно-геологические данные грунтовых условий г. Кызылорда [Engineering and geological data of the soil conditions of Kyzylorda] [Electronic resource]. - Access mode: <http://geology.gov.kz/>, <https://www.gov.kz/memleket/entities/geology> [in Russian]