

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.834

ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ г. СЫКТЫВКАР ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

© 2021 г. В. А. Лютоев^{1,*}, А. Н. Вихоть^{1,**}

¹ Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук ул. Первомайская, 54, Сыктывкар 167000, Россия

*E-mail: lutoev@geo.komisc.ru

**E-mail: vikhot.anna@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 21.02.2021 г.

С ростом уровня урбанизации возрастает интенсивность транспортных потоков и развивается высотное строительство. В частности, в г. Сыктывкар увеличивается динамическая нагрузка на грунты в основаниях зданий и придомовых территорий. Наряду с этим меняется концепция строительства зданий, однако в настоящее время общая нормативная база в должной форме еще не принята. Рыхлые грунты тиксотропной структуры часто неустойчивы к внешним нагрузкам, поэтому актуальным становится вопрос изучения приращения балльности для местных грунтов, определения предельных значений устойчивости грунтов к местной платформенной рассеянной сейсмичности и микросейсмическому воздействию со стороны вибрационного поля города. Образцы грунтов гляциальных, флювиогляциальных, аллювиальных отложений пластичного состояния и зернистой структуры г. Сыктывкар и его окрестностей испытаны вибродинамическим нагружением с амплитудами ускорений 0.022–1.9 м/с², соответствующими магнитудам сотрясения 1.9–6.4 единиц. Наблюдения показали, момент эффективного воздействия для слабых грунтов начинается уже с 5–7 с. Построен график повторяемости землетрясений, выведено эмпирическое уравнение $I(\text{балл}) = 1.3 \times \lg T + 2.3 \pm 0.2$. Установлено, что повтор 7-балльного землетрясения возможен с вероятностью 0.5% в течение 50 лет, 6-балльного – с вероятностью 1% в течение 50 лет, накопление потенциальной сейсмической энергии вблизи г. Сыктывкар вполне вероятно. Получены функциональные зависимости поведения грунтов при нагрузках с магнитудами, соответствующими энергетическим характеристикам землетрясений. Расчеты показали, что приращение балльности зависит от глубины залегания водоносного горизонта. Горизонтальные сдвиговые напряжения, возникающие при распространении поперечных волн, являются основным компонентом напряжений в момент землетрясения. Воздействие вибрационного поля города на подстилающие грунты охватывает более длительный временной промежуток циклических нагрузок. Для расчетов в данном случае предложено решать плоскую задачу для упругого полупространства.

Ключевые слова: *связные и несвязные грунты, землетрясение, приращение балльности, вибродинамическая нагрузка, пиковое ускорение грунта, уплотнение, вторичное изменение*

DOI: 10.31857/S0869780921030048

ВВЕДЕНИЕ

В инженерной геологии особое внимание уделяется изучению урбанизированных территорий, расположенных в долинах рек, сложенных четвертичными отложениями. В г. Сыктывкар и его окрестностях выделено несколько генетических типов отложений: аллювиальный, озерно-болотный, болотный, озерно-аллювиальный, флювиогляциальный, озерно-ледниковый, ледниковый, озерный. Здесь залегают пески крупные, средние, мелкие, пылеватые. Кроме песков в разрезе присутствуют и глинистые грунты с показателем $I_L < 0.5$ при коэффициенте пористости $e = 0.9$ для глин и

суглинков и $e = 0.7$ – для супесей. В отложениях встречаются водонасыщенные пески с показателем $S_r > 0.5$ при различной зернистости. Это указывает на низкую степень устойчивости четвертичных отложений к сейсмическим явлениям. В пределах города мощности рыхлых четвертичных отложений варьируются от 5 до 60 м, сюда же отнесены и моренные отложения (II категория). Именно эти отложения наиболее пригодны для оснований фундаментов высотных зданий г. Сыктывкара, а менее надежны формации грунтов III и IV (особая) категорий. Скальные грунты (I категория) залегают на глубине 200–300 м, в связи с

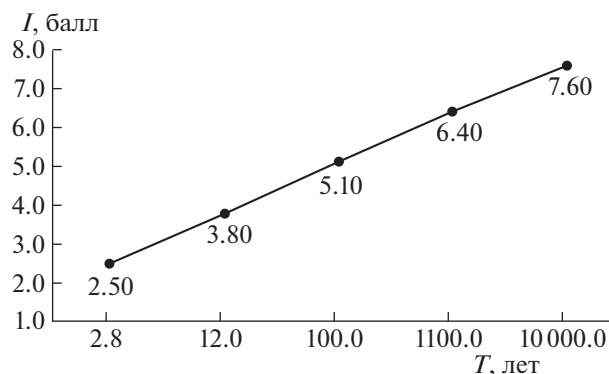


Рис. 1. График повторяемости землетрясений для северной оконечности Волго-Уральской антеклизы.

чем их использование для оснований фундаментов не представляется возможным.

В связи с этим рассмотрим приращение балльности в связных и несвязных рыхлых грунтах, относительно которых происходит усиление или ослабление сейсмических воздействий на дневной поверхности¹. Вместе с тем такие грунты при изменении местных природных и природно-техногенных условий могут перейти в неустойчивое состояние вследствие разрыхления, разжижения, просадки и др. Такие качественные изменения наступают под действием тектонических или микротектонических природно-техногенных явлений, происходящих в слабых грунтах.

К особо опасным объектам г. Сыктывкар можно отнести Сыктывкарский лесопромышленный комплекс, который находится в плейсто-сейстовой области Кировско-Кажимской сейсмогенной зоны [4]. Для определения защитных мер при возведении высотных зданий и сложных промышленных объектов строительства в условиях платформенной сейсмичности необходимо учитывать устойчивость рыхлых грунтов к динамическим нагрузкам [5]. На сейсмической карте ОСР-2015-С южная часть Республики Коми находится в сейсмической зоне, где может произойти 7-балльное землетрясение в районе г. Сыктывкар в течение 50 лет с 1% вероятностью [8, 11]. Поэтому для предупреждения негативных последствий от возможного землетрясения необходимо использование, прежде всего, как классических результатов инженерно-геологических исследований, так и проверки сейсмической устойчивости рыхлых горных пород вибродинамическим нагружением.

Цель исследований — выяснение предельной степени устойчивости рыхлых четвертичных отложений в основаниях фундаментов зданий

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2015. 116 с. <http://docs.cntd.ru/document/550565571>

г. Сыктывкар к сейсмическим и микросейсмическим воздействиям.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ И МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сыктывкар расположен в северной части Волго-Уральской антеклизы, в зоне сочленения Сысольского свода, Вычегодского прогиба, Кировско-Кажимского авлакогена. Данный тектонический узел проявляет себя редкой платформенной сейсмичностью с интенсивностью на дневной поверхности от 3 до 5 баллов по МШСИЗ-1². Однако есть исторические сведения о землетрясении и большей балльности, например, Сысольское землетрясение [10], произошедшее в 1939 г., которое было зафиксировано сейсмическими станциями: “Свердловск”, “Москва”, “Пулково”, “Фрунзе”, “Андижан”. Максимальная сила сотрясений в поверхностном слое по макросейсмическим данным достигала семи баллов по МШСИЗ-18 [1, 2]. Используя статистические данные и параметры местных слабых землетрясений [11], привлекая модели зон ВОЗ ОСР-97 (А, В, С, D), по своду правил³ построен график повторяемости землетрясений (рис. 1), и на его основе выведено эмпирическое уравнение: $I(\text{балл}) = 1.3 \lg T + 2.3 \pm 0.2$, где T — период повторяемости землетрясений в годах. Гистограмма средневзвешенной оценки магнитуды и интенсивности землетрясения представлена на рис. 2.

Анализируя график вероятности сейсмических событий, можно предположить, что повтор 7-балльного землетрясения в рамках максимального расчетного землетрясения возможен с вероятностью 0.5% в течение 50 лет и 6-балльного землетрясения с вероятностью 1% в течение 50 лет. Следовательно, при данных сейсмических условиях с учетом расположения геологических структур, разграниченных глубинными разломами, постепенное накопление потенциала сейсмической энергии вблизи г. Сыктывкар становится вполне вероятно.

Поэтому возникает необходимость изучения инженерно-геологических условий с точки зрения зависимости приращения балльности от грунтовых условий. Местной особенностью является то, что скальные грунты на данной территории находятся на относительно большой глубине, поэтому дисперсные грунты имеют большие мощности фактически на всей территории горо-

² ГОСТ 34511-2018. Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с. <http://docs.cntd.ru/document/1200163880>

³ СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. М.: Стандартинформ, 2016. 29 с. <http://docs.cntd.ru/document/456085879>

да. Кроме того, они часто обводнены, в связи с чем велика вероятность существенного усиления балльности. В скальных грунтах приращение балльности — 0 баллов (I категория); в песках оно зависит от крупности зерен и глубины залегания УГВ, может достигать 0.7–2.0 баллов (III категория); в связных грунтах — 0.3–1.6 баллов (II категория) [4].

Микросейсмические шумы слабы и для города не опасны. Фоновые значения микросейсмических колебаний при преобладающих частотах 0.5–2 Гц для горизонтальных компонент амплитуды — $2 \cdot 10^{-11}$ м, для вертикальных — 10^{-11} м [6]. Вибросейсмический мониторинг по компонентам x , y и z показывает, что не менее 70% территории города находятся в условиях сверхнормативной вибронагрузки по виброускорению и виброскорости: большая площадь превышения отмечается по компоненте z , в наименьшей степени — по компоненте x [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для испытаний использовалась вибродинамическая установка, способная развивать амплитуду ускорения колебаний от 0.022 м/с^2 до 1.9 м/с^2 , что соответствует ускорению динамического воздействия от 1.9 до 6.4 единиц магнитуды. Грунты были отобраны специальным керноотборником, позволяющим сохранить их первичные структурные связи.

Величины ускорений, соответствующие указанным магнитудам, создавались с помощью вибродинамической установки, где при циклических испытаниях отобранных грунтов они могут достигать величин, сопоставимых с ускорениями землетрясений. Для этого использовали генератор колебаний АЯЦМ 3.901.002 ТУ (250 Вт) весом 35 кг; частотный преобразователь ГРИВ 426449.001 от 1 до 30 Гц с возможностью плавного усиления величины уровня вибраций, способный задавать амплитуды ускорений от 0.022 до 1.9 м/с^2 в интервале соответствия энергии магнитуды (табл. 1) в рамках шкалы балльности МШИЗ-18; датчик вертикального смещения грунта — электронные индикаторные часы ИЦ-12.5 с ценой деления 0.01 мм при диапазоне измерений от 0 до 12.5 мм , погрешность измерения $\pm 0.015 \text{ мм}$; подставку для крепления датчика смещения и керновый держатель вместе с испытуемым грунтом, вес которого менялся от 1.2 до 1.6 кг. Все выше приведенное оборудование жестко закреплено на железной плите массой 115 кг. Градуировка уровня ускорений была установлена с помощью широкополосного сейсмометра “ZET 048-C”, имеющего диапазон ускорений от 0.3 до 400 Гц, это позволило зафиксировать диапазон ускорений от 0.0022 до 0.19 g (см. табл. 1). Погрешность в измерениях

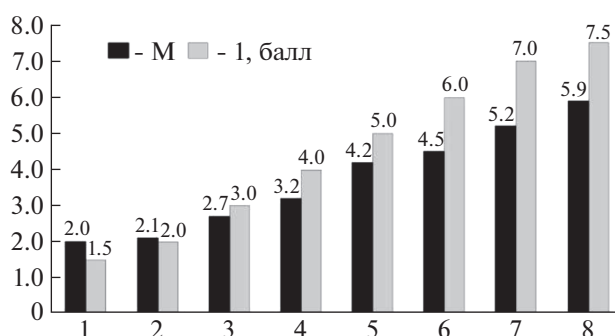


Рис. 2. Средневзвешенная оценка магнитуды и интенсивности землетрясения относительно значений пикового ускорения грунта (peak ground acceleration — PGA, м/с²).

при испытаниях зернистых грунтов составила 7–10%, пластичных — 5–7%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего было испытано 26 образцов грунта из интересующих нас горизонтов — от низкой прирусловой поймы до самой верхней флювиогляциальной террасы (рис. 3). В результате их испытаний было выяснено, что в данном диапазоне нагружений пылеватые и мелкие маловлажные пески переходят из стадии уплотнения в стадию разрыхления, а при наличии свободной воды — в стадию разжижения. Что касается глин и суглинков, то их первичные структурные связи уже при амплитуде 0.053 м/с^2 начинают претерпевать изменения, а при увеличении длительности колебаний начинают разрушаться и водно-коллоидные связи, вследствие чего грунты переходят в пластично-текучее и текучее состояние.

Во время эксперимента было замечено, что длительность воздействия также влияет на снижение первоначальной прочности испытуемых грунтов. При этом время эффективного воздействия для слабых грунтов начинается уже с 5–7 с. Общая же длительность испытания грунтов составляла 20–30 с, что соответствует времени формирования сейсмических акселерограмм при тектонических сдвигах в геологических разрезах, включающих рыхлые отложения.

По результатам были построены зависимости в виде кривых (см. рис. 3 и табл. 1) при постепенном увеличении амплитуд колебаний динамического воздействия на четвертичные грунты и при росте ускорения от минимальной величины 0.022 до максимальной — 1.9 м/с^2 .

Одновременно с этим были определены табличные значения, имеющие свои условные соотношения между величиной ускорения и магнитудой, а также интенсивностью видимых изменений от динамических воздействий. Таким образом,

Таблица 1. Динамические испытания и предельное приращение балльности для грунтов г. Сыктывкар от носительно магнитуд от минимального до максимального значения

№ п/п	a , м/с ²	$a \cdot g$	M	I , балл
1	0.022	0.0022	1.9	I
2	0.026	0.0026	2.0	I
3	0.031	0.0031	2.1	II
4	0.037	0.0037	2.2	II
5	0.043	0.0043	2.3	II
6	0.053	0.0053	2.5	III
7	0.066	0.0066	2.7	III
8	0.078	0.0078	2.9	III
9	0.087	0.0087	3.2	IV
10	0.13	0.013	3.5	IV
11	0.21	0.021	3.8	V
12	0.31	0.031	4.2	V
13	0.38	0.038	4.5	VI
14	0.47	0.047	5.2	VI
15	0.59	0.059	5.5	VII
16	0.70	0.070	5.7	VII
17	0.86	0.086	5.9	VIII
18	1.22	0.122	6.1	VIII
19	1.28	0.128	6.2	VIII
20	1.51	0.151	6.3	VIII
21	1.9	0.19	6.4	VIII

Примечание: a , м/с² – ускорение колебаний, $a \cdot g$ – относительное ускорение, M – магнитуда Рихтера, I – МШСИЗ-18.

были получены соотношения между параметрами количественного и качественного содержания (табл. 2).

В настоящее время общепризнан факт, что большая часть колебаний грунтового массива во время землетрясений генерируется вертикально направленными объемными волнами, зарождающимися в очаге в скальных породах [3, 9]. В целом сейсмическая волна состоит из объемных волн: P -волны сжатия–растяжения и S -волны сдвига, приходящей с небольшим задержанием в несколько секунд по отношению к продольной волне; и поверхностных волн L и R , которые проявляют себя с меньшей интенсивностью. В случае прохождения через водонасыщенные грунты или воду эффект разрушения продольной волны ослабевает. Напряжение, возникающее при распространении поперечных волн, является наиболее опасным в виду большей амплитудной сдвиговой составляющей, которая равна произведению массы грунта на глубину очага землетрясения с учетом коэффициента затухания сейсмических волн.

Исходя из полученных соотношений, можно перейти к рассмотрению вопроса о приращении балльности, указывающей на качественный характер и масштаб воздействия на подстилающие грунты в основании фундаментов зданий. При распространении волн сжатия и сдвига в мало-влажных грунтах возникает трехосная деформация, которую можно выразить общей формулой [3]:

$$\frac{\sigma dh}{\sigma dv} = \frac{v}{1 - v},$$

где σdh – нормальные горизонтальные напряжения, σdv – нормальные вертикальные напряжения, v – коэффициент Пуассона. Приращение балльности в этих условиях возникает за счет взаимодействия акустических жесткостей между слоями разреза.

В случае водонасыщенного грунта общее уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta V_w}{nV} = C1 \cdot u,$$

где ΔV_w – величина сжимаемости, nV – объем воды в порах грунта, $C1$ – сжимаемость самой воды, u – поровое давление.

Приращение балльности в этих условиях возникает в зависимости от глубины залегания водоносного горизонта. При этом в обоих случаях горизонтальные сдвиговые напряжения, возникающие при распространении поперечных волн, являются основным компонентом напряжений в момент землетрясения.

Что касается влияния природно-техногенной составляющей в виде длительных микроколебаний на подстилающие грунты от вибрационного поля города, то повторяющиеся циклы колебаний занимают больший временной промежуток, что постепенно меняет первоначальную структуру поверхностных грунтов. Теоретически для расчета таких воздействий на полупространство условной величины по поверхности P_0 и шириной $2a$, где действует двухмерная плоская нагрузка, принимается сообщение напряжений грунту в направлении от увеличения к ослаблению по мере движения автотранспорта. При этом основная роль отводится инженерным решениям, связанным с определением функциональных зависимостей, затрагивающих как условно линейные, так и нелинейные свойства грунтов верхнего полупространства. Важным моментом является определение пиковых ускорений (PGA) от землетрясений, взрывов, транспортного потока и других источников возмущения техносферы, которые подвергают грунты сдвиговым деформациям с последующей их структурной реорганизацией: если диапазон деформаций – 10^{-6} – 10^{-4} д.е. малый, то задача решается с позиции упругой модели, когда определяется модуль Юнга; если дефор-

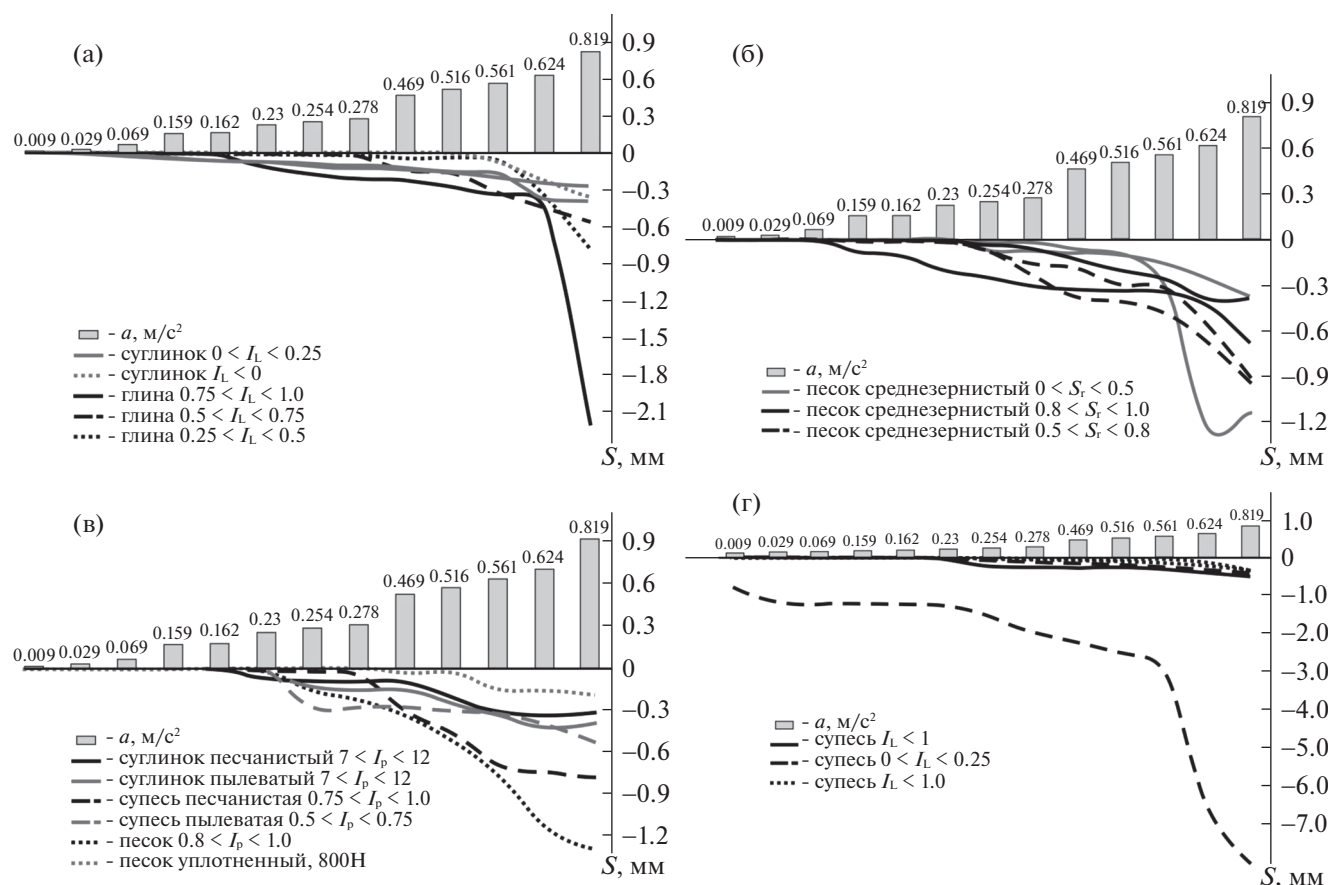


Рис. 3. Функциональные кривые зависимости поведения связных и несвязных грунтов от интенсивности вибрационной нагрузки: а – глин и суглинков; б – песков; в – переотложенных техногенных грунтов; г – супесей.

мация принимает значения $>10^{-2}$ д.е., то изменение структуры грунта характеризуется гистерезисом прогрессирующего типа, в таком случае необходимо применять пошаговое интегрирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом исторических и инструментальных сведений о местных сейсмических событиях, отмеченных на карте ОСР-97, исходя из полученного эмпирического уравнения, можно утверждать, что для Сыктывкара возможны следующие вероятные величины интенсивности проектного и максимально расчетного землетрясений:

1. ОСР-97А с 10% вероятностью $I = 5$ баллов в течение 50 лет (за 100 лет);
2. ОСР-97В с 5% вероятностью $I = 5$ баллов в течение 50 лет (за 500 лет);
3. ОСР-97С с 1% вероятностью $I = 6$ баллов в течение 50 лет (за 5000 лет);
4. ОСР-97Д с 0.5% вероятностью $I = 7$ баллов в течение 50 лет (за 10000 лет).

Исследования показали, что в условиях возрастающей нагрузки сейсмического и микросей-

смического характера на грунты под фундаментами зданий вибродинамические испытания грунтов очень важны в виду того, что нагрузки подобного характера приводят к изменениям структуры грунтов и их физико-механических свойств. В частности, для г. Сыктывкара дополнительно принятые меры, исходя из результатов испытаний, позволят повысить этажность строительства. На данный момент при заложении фундаментов требуется соблюдение действующих норм жилищного строительства, учитывающих инженерно-геологические условия в соответствии со сводом правил⁴:

- 1) участки развития ледниковых отложений (гИрп) в геологическом разрезе по условиям строительства относятся к территориям с удовлетворительными несущими свойствами грунтов, здесь допустимо строительство многоэтажных зданий, с учетом результатов испытаний повышенная этажность представится возможной;

⁴ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. М., 2017. 160 с.
<http://docs.cntd.ru/document/456054206>

Таблица 2. Результаты исследований влияния вибраций на поведение грунтов

$a, \text{ м/с}^2$	0.009	0.029	0.069	0.159	0.162	0.23	0.254	0.378	0.469	0.516	0.561	0.624	0.819
Пески пылеватые													
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$						3.6/VI				5.2/VII		5.7/VIII	
Пески мелкозернистые													
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$			2.7/III		3.5/IV						5.5/VII		
$0 \leq S_r \leq 0.5$					3.2/IV						5.2/VI	5.7/VIII	
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI		4.5/VII			5.5/VIII		
Пески тонкозернистые													
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI				5.3/VII		5.7/VIII	
Пески среднезернистые													
$0 \leq S_r \leq 0.5$							3.8/IV				5.5/VII		5.8/VIII
$0.5 \leq S_r \leq 0.8$							3.8/V				5.5/VII		5.8/VIII
$0.8 \leq S_r \leq 1$													5.9/IX
Пески крупнозернистые													
$0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI				5.3/VII		5.7/VIII	
Глины													
$0.75 \leq I_L \leq 1$		2.0/III								5.2/VII		5.5/VII	
$0.5 \leq I_L \leq 0.75$				3.5/IV						4.4/VI		4.5/VII	
$0.25 \leq I_L \leq 0.5$					3.5/V					4.5/VI			4.5/VII
$0 \leq I_L \leq 0.25$			2.7/III										4.5/VI
Суглинки													
$0 \leq I_L \leq 0.25$			2.7/III			3.7/IV					4.5/VI		
$I_L < 0$							3.8/IV			×	4.5/V		
Супеси													
$I_L > 1$	1.9/IV				3.0/IV								4.7/VIII
$I_L < 0$													4.7/VI
Смешанные грунты													
Дресва+ песок СЗП $0 \leq S_r \leq 0.5$							3.8/V						5.7/VII
УТГ $0.8 \leq S_r \leq 1$						3.6/VI		4.5/VII					
УТГ (800 Н) $0 \leq S_r \leq 0.5$									5.2/VI		5.5/VII		
Г+П+Съ	1.9/IV				3.5–3.6/V	3.8/VI			5.2/VI			5.7/VII	
Съ+ТЗП					3.6/V				5.2/VII		5.5/VIII		
Сг+СЗП					3.7/VI				5.2/VII			5.7/VIII	
Г+Сг						3.5/V			5.2/VI			5.7/VII	

Примечание: УТГ – уплотненный техногенный грунт, 800 Н – сила, приложенная на уплотнение, Г – глина, СЗП – средне-зернистый песок, П – песок, Съ – супесь, ТЗП – тонкозернистый песок, Сг – суглинок.

2) участки аллювиальных отложений третьей надпойменной террасы ($a^3\Pi s-l$), озерно-аллювиальных отложений третьей и второй надпойменных террас ($la^2\Pi bz-p$, $la^3\Pi s-l$), верхне-вычегодский подгоризонт, флювиогляциальные отложения зан-

дровой равнины ($f\Pi v\check{c}_3$) пригодны к возведению на них зданий средней этажности, допускается возможность строительства 6–9-этажных зданий;

3) на участках аллювиальных и озерно-болотных отложений первой надпойменной террасы

(a^1IV_1 , $IbIV_3$) и аллювиальных отложений второй террасы (a^2IIIb_z-p) допускается строить 1–2-этажные дома из легких материалов, не рекомендуется повышать этажность строительства в виду нерентабельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьин И.В.* К вопросу проявления некоторых землетрясений в восточной части Восточно-Европейской платформы. Исследование сейсмической опасности // Вопросы инженерной сейсмологии. 1988. Вып. 29. С. 119–124.
2. *Андреев С.С.* О сейсмической характеристике Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 12. С. 1484–1487.
3. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях: Пер. с англ. СПб.: НПО “Геореконструкция-Фундамент-проект”, 2006. 384 с.
4. *Лютеев В.А.* Акселерограммы сильных движений Сыктывкара // Вестник Института геологии КНЦ УрО РАН. 2018. № 11. С. 12–21.
5. *Лютеев В.А.* Вибросейсмы и их влияние на геологическую среду в районе ТЭЦ Сыктывкарского ЛПК // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 20–42.
6. *Лютеев В.А.* Сейсмогенные зоны Республики Коми и особенности микросейсмического районирования г. Сыктывкара: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 2001. 32 с.
7. *Лютеев В.А., Вихоть А.Н.* Влияние оползневых процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду города Сыктывкара. Сыктывкар: ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. 84 с.
8. *Носкова Н.Н., Михайлова Р.С.* Республика Коми и Кировская область // Землетрясения Северной Евразии. 2011. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 228–238.
9. *Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Науч. мир, 2009. 260 с.
10. *Тимонин Н.И.* Сысольское землетрясение 1939 г. (материалы опроса) // Коми научный центр УрО РАН АН СССР. Сыктывкар, 1986.
11. *Удортин В.В., Носкова Н.Н.* Современные землетрясения // Вест. Института геологии. 2010. № 9. С. 40–42.

GROUND BEHAVIOR IN SYKTYVKAR UNDER SEISMIC AND MICROSEISMIC IMPACT

V. A. Lyutov^{a, #} and A. N. Vikhot^{a, ##}

^a *Yushkin Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences
ul. Pervomaiskaya, 54, Syktyvkar, 167000 Russia*

[#] *E-mail: lyutov@geo.komisc.ru*

^{##} *E-mail: vikhot.anna@mail.ru*

Urbanization growth results in the increasing traffic intensity and developing high-rise construction. In particular, in Syktyvkar, the dynamic loading on soils in building foundations and adjacent territories rises. The conception of civil engineering changes, but at present the regulatory standards has not been adopted there yet. Loose soils of thixotropic structure are often unstable to external load; therefore, the study of seismic score increment for local soils, determination of threshold values of soil resistance to local platform dissipated seismicity and microseismic impact from the urban vibration field becomes acute. Samples of glacial, fluvioglacial, and alluvial deposits of the plastic state and granular structure collected in Syktyvkar and its outskirts were tested by vibrodynamic loading with acceleration amplitudes of 0.022–1.9 m/s² corresponding to shock magnitudes of 1.9–6.4 units. According to observations, the effective impact moment for loose soils began already at 5–7 s. The graph of an occurrence frequency of earthquakes was plotted, and the empirical equation was deduced: $I(\text{point}) = 1.3 \times \log T + 2.3 \pm 0.2$. It was established that recurrence of a magnitude 7 earthquake is possible with a 0.5% probability within 50 years, a magnitude 6 earthquake—with a probability of 1% within 50 years, and accumulation of a potential seismic energy near Syktyvkar is quite probable. The functional dependencies of soil behavior have been obtained under loads corresponding to energy earthquakes characteristics. Calculations showed that the earthquake intensity increment depends on the aquifer depth. Horizontal shear stresses arising from a shear-wave propagation are the main stress component upon an earthquake. The vibration field impact on underlying soils of the city covers a longer time period of cyclic loads. In this case, for calculations we propose to solve a flat stress problem for an elastic half-space.

Keywords: *coherent and incoherent soils, earthquake, earthquake intensity increment, vibrodynamic loading, PGA, soil compaction, secondary changes*

REFERENCES

1. Anan'in, I.V. *K voprosy proyavleniya nekotorykh zemletryaseni v vostochnoi chasti Vostochno-Evropeiskoi platformy. Issledovanie seismicheskoi opasnosti* [On the issue of manifestation of some earthquakes in the eastern part of the East European platform. Seismic hazard study]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems in engineering seismology]. 1988. Iss. 29. P. 119–124. (in Russian)
2. Andreev, S.S. *O seismicheskoi kharakteristike Russkoi platformy* [About seismic characteristics of the Russian platform]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geofiz.*, 1956. № 12. P. 1484–1487. (in Russian)
3. Ishihara, K. *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford, Clarendon press, 1996. 181 p.
4. Lyutoev, V.A. *Akselerogrammy sil'nykh dvizhenii Syktyv-kara* [Basis of seismic microundation for Syktyvkar]. *Vestnik Instituta geologii KHTs UrO RAN*, 2018, no. 11. P. 12–21. (in Russian)
5. Lyutoev, V.A. *Vibroseismy i ikh vliyanie na geologicheskuyu sredy v raione TETs Syktyvskarskogo LPK* [Vibro-seisms and their effect on the geoenvironment in the area of Syktyvkar heating plant]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Problems in engineering seismology]. 2008. Iss. 35. № 29. P. 20–42. (in Russian)
6. Lyutoev, V.A. *Seismogennyye zony Respubliki Komi i osobennosti mikroiseimoraionirovaniya g. Syktyv-kara* [Seismogenic areas of the Komi Republic and specific features of microzoning in Syktyvkar]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Syktyvkar, 2001, 32 p. (in Russian)
7. Lyutoev, V.A., Vikhot', A.N. *Vliyanie opolznevykh protsessov i prirodno-tekhnogennoi mikroiseimichnosti na geologicheskuyu sredy goroda Syktyv-kara* [The impact of landslide processes as well as natural and human-induced seismicity on the geological environment of the Syktyvkar city]. Syktyvkar, FITs Komi NTs UrO RAN, 2019, 84 p. (in Russian)
8. Noskova, N.N., Mikhailova, R.S. *Respublika Komi i Kirovskaya oblast'* [The Komi Republic and the Kirov region]. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii. 2011* [Earthquakes of the Northern Eurasia. 2011], Obninsk, FITs EGS RAN, 2017. P. 228–238. (in Russian)
9. Pavlenko, O.V. *Seismicheskie volny v gruntovykh sloyakh: nelineinoe povedenie grunta pri sil'nykh zemletryasenyakh poslednikh let* [Seismic waves in soil layers: nonlinear soil behavior in recent strong earthquakes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 260 p. (in Russian)
10. Timonin, N.I. *Sysol'skoe zemletryasenie 1939 g. (materialy oprosa)* [Earthquake in the year 1939 (inquiry data)]. Syktyvkar, Komi NTs UrO RAN, 1986. (in Russian)
11. Udoratin, V.V., Noskova, N.N. *Sovremennyye zemletryaseniya* [Modern earthquakes]. *Vestnik Instituta geologii KHTs UrO RAN*, 2010. № 9. P. 40–42. (in Russian)