

УДК 550.343:552.097

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ

© 2019 г. Б. А. Трифонов^{1,*}, В. В. Севостьянов¹, С. Ю. Милановский², В. В. Несынов¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: igelab@mail.ru

²ФГУБН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН),
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

Поступила в редакцию 5.04.2019 г.

Среди специалистов, занимающихся вопросами сейсмического микрорайонирования (СМР), существуют различные мнения по поводу необходимости учета реакции обводненных дисперсных грунтов для оценки ожидаемого сейсмического эффекта. Ряд исследователей считает нецелесообразным применять поправку за уровень подземных вод (УПВ) в методе сейсмических жесткостей (МСЖ). Авторами анализируются результаты как своих полевых исследований, так и других специалистов, занимающихся развитием методологии СМР. Особое внимание обращается на роль влияния УПВ при расчете приращения сейсмической интенсивности ($\Delta I_{\text{УПВ}}$) по формуле С.В. Медведева при расчетах в МСЖ по скоростям поперечных волн. Приведенные в статье результаты исследований показывают преждевременность полного отказа от поправки $\Delta I_{\text{УПВ}}$ в расчетах приращения сейсмической интенсивности. Авторам статьи представляется целесообразным дальнейшее продолжение натуральных экспериментов по регистрации сильных движений на водонасыщенных дисперсных грунтах.

Ключевые слова: сейсмическая интенсивность, дисперсные грунты, обводненность грунтов, приращение балльности, нелинейные процессы, сейсмическое микрорайонирование, метод сейсмических жесткостей.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019574-81>

УЧЕТ УХУДШЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ В МЕТОДЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЖЕСТКОСТЕЙ (ПО С.В. МЕДВЕДЕВУ)

По результатам наблюдений за последствиями землетрясений отмечено, что разрушительный эффект (повышенный процент разрушений и повреждений построек) обусловлен многими факторами: спектральным составом сейсмических колебаний землетрясения; частотой собственных колебаний здания/сооружения; передаточной функцией геологического разреза (скальное основание – толща рыхлых отложений – дневная поверхность) и собственно усилением разрушительного эффекта от наличия в инженерно-геологическом разрезе водонасыщенных дисперсных грунтов по сравнению с маловлажными грунтами.

Из практики исследования последствий сильных землетрясений известно, что интенсивность

их проявления зависит от категории грунта по сейсмическим свойствам. При оценке приращения сейсмической интенсивности относительно эталонного грунта, основанного на методе сейсмических жесткостей (МСЖ), вводится дополнительная поправка за уровень подземных вод, и ее величина в зависимости от типа дисперсного грунта изменяется от 0 до 1 балла по макросейсмической шкале сейсмической интенсивности.

В связи с этим для учета влияния на величину сейсмической интенсивности уровня подземных вод (УПВ) С.В. Медведев в 1952 г. [8] предложил эмпирическую зависимость для расчета поправки в приращение сейсмической интенсивности. При этом расчет поправки производится для 10-метровой толщи от дневной поверхности, и ее величина зависит от УПВ и типа водовмещающего грунта. В основу эмпирической зависимости расчета поправки на УПВ заложены опосредованные данные о повреждениях построек во время землетрясений.

Макросейсмические наблюдения показывают, что во многих случаях обводненность грунтов повышает сейсмический эффект. При этом $\Delta I_{\text{УПВ}}$ для грунтов различных типов изменяется в значительных пределах. При изучении последствий землетрясения 11.09.1927 г. в Алуште С.В. Медведев установил различие в 3 балла между степенью повреждения зданий, расположенных на «худших» (насыпные, морские и аллювиальные песчано-глинистые отложения при УПВ = 2-3 м) и на «лучших» грунтах (коренные глинистые сланцы и дробленые сланцы с УПВ, залегающим на больших глубинах). При землетрясении 11.09.1927 г. повреждения зданий в Ялте были более значительны в районе набережной в местах распространения насыпных грунтов и высоким положением УПВ [7]. В Японии на о. Хонсю от землетрясения 7.12.1944 г. наибольшие разрушения наблюдались также в долинах, где глинистые заболоченные отложения тянутся вдоль нижнего течения рек. По результатам наблюдений, как отечественных, так и зарубежных исследователей, за последствиями разрушений от многих других землетрясений С.В. Медведев сформулировал выводы: при глубине залегания УПВ > 10 м его положение не влияет на величину сейсмической интенсивности проявления землетрясения; в пределах верхней 10-метровой толщи повышение УПВ от 10 до 0 м ведет к увеличению интенсивности проявления землетрясения, причем его интенсивность зависит от типа грунтовой толщи.

В отдельных случаях С.В. Медведев отмечал, что при взрывах по результатам сейсмометрических наблюдений фиксировалось увеличение скорости колебаний почти вдвое на водонасыщенных

грунтах по сравнению с грунтами, находящимися в состоянии естественной влажности. Полученные С.В. Медведевым результаты оценки уровня сейсмической опасности для сооружений в зависимости от грунтовых условий корреспондируются с заключениями/результатами других авторов (В.В. Попов, И.А. Гзелишвили, А.Н. Сафарян, В.О. Цшохер, Г. Рейд [12] и А. Зиберг [13]). Совокупность результатов исследований различных авторов приведена в табл. 1, и их анализ показывает отсутствие существенных расхождений в оценке сейсмической интенсивности, связанных с УПВ.

В настоящее время, согласно действующим нормативным документам¹, регламентирующим выполнение работ по СМР, приращение сейсмической интенсивности относительно эталонных грунтов за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов при водонасыщении ($\Delta I_{\text{УПВ}}$ в баллах) определяется в соответствии с зависимостью:

$$\Delta I_{\text{УПВ}} = K \cdot e^{-0.04h^2} \quad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от литологического состава грунта; h – расчетное положение УПВ на период максимума. Коэффициент K принимается равным:

- 1 – для глинистых и песчаных грунтов;
- 0.5 – для крупнообломочных грунтов с содержанием песчано-глинистого заполнителя не менее 30% и сильновыветрелых скальных грунтов;

¹ РСН 65-87. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: Стройиздат, 1986. 32 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854919.htm>

Таблица 1. Оценка приращений сейсмической интенсивности относительно эталонных грунтов по данным С.В. Медведева и других авторов

Грунты	По исследованиям					
	С.В. Медведева [8]	В.В. Попова, И.А. Гзелишвили, А.Н. Сафарян В.О. Цшохера [7]			Н.Ф. Рейда [12]	А. Зиберга [13]
Граниты	0	0	0	0	0	0
Известняки, песчаники, сланцы	0.2-1.3	0-1	1	0-1	0-1.2	0.5-1
Гипсы, мергели	0.6-1.4	1	1	1	1-1.5	1-1.5
Крупнообломочные грунты (щебень, галька, гравий)	1-1.6	1-1	2	1-2	1.2-2.1	1.5-2
Песчаные грунты	1.2-1.8	1-2	2	1-2	1.2-2.1	1-2
Глинистые грунты	1.2-2.1	1-2	2	1-3	1.5-2	1.2-2
Насыпные грунты	2.3-3	3	3	2-3	2.1-3.4	2-3
Обводненные грунты (гравийные, песчаные, глинистые)	1.7-2.8	3-4	3	2-3	2-3	2.2-3
Обводненные насыпные и почвенные грунты (болото)	3.3-3.9	4	4	3-4	3.5	3-4

• 0 – для плотных крупнообломочных грунтов из магматических пород с содержанием песчано-глинистого заполнителя до 30% и слабовыветрелых скальных грунтов.

Таким образом, приращение интенсивности $\Delta I_{\text{УПВ}}$, согласно данным С.В. Медведева, определяется глубиной залегания уровня подземных вод (h , м) и литологическим составом водонасыщенного грунта.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОБВОДНЕННОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ В МЕТОДЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЖЕСТКОСТЕЙ

В работах ряда авторов [1, 2, 4, 11] высказывается мнение о независимости приращения сейсмической интенсивности от уровня подземных вод и предлагается отменить (не вводить) поправку $\Delta I_{\text{УПВ}}$ за обводненность грунтов, представленную в эмпирической зависимости (1) С.В. Медведева.

В то же время указывается, что нет сомнений в результатах макросейсмических обследований С.В. Медведева прошлых лет, на основании которых выведена зависимость приращения сейсмической интенсивности от литологического состава грунта и положения УПВ. Также отмечается, что проявляющиеся при сильных сейсмических воздействиях эффекты не обязательно должны присутствовать при слабых.

В рекомендациях по сейсмическому микрорайонированию транспортных объектов² авторы также полагают, что при использовании в МСЖ скоростей только поперечных волн (V_s) поправку $\Delta I_{\text{УПВ}}$ на влияние обводненности грунтов вводить не следует. Считается, что повышенный процент разрушений и повреждений построек при высоком положении УПВ обусловлен главным образом меньшей прочностью структурных связей в водонасыщенных дисперсных грунтах по сравнению с аналогичными маловлажными грунтами.

В работе Н.И. Кригера и др. [5] показано, что на величину скорости упругих волн и соответствующие им упругие модули влияет наличие в грунтах разных категорий влаги (гравитационная, капиллярная, пленочная, рыхлосвязная и прочносвязная). Н.И. Кригером [5] на основании обработки многочисленных записей слабых землетрясений была предложена зависимость амплитуды сейсмических колебаний от положения УПВ в лессовых грунтах. Аналитически полученная зависимость выражается формулой:

$$\Delta I = 2.2 \cdot 10^{-0.2h},$$

где h – глубина УПВ в лессовых грунтах.

А.Б. Максимов, изучая механизмы разрушения грунта продольными и поперечными волнами [6], сделал вывод, что линейная экстраполяция данных по слабым землетрясениям в область сильных и недоучет нелинейных явлений могут привести к ошибкам в оценке сейсмической опасности при прогнозе поведения рыхлых грунтов во время сильных землетрясений (более 7 баллов). Данный факт свидетельствует о необходимости взвешенного, осторожного подхода к оценке поправки $\Delta I_{\text{УПВ}}$ в приращение сейсмической интенсивности водонасыщенных дисперсных грунтов.

ОПЫТ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ОБВОДНЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕГИСТРАЦИИ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследования на обводненных дисперсных грунтах проводились авторами под научным руководством И.Г. Минделя при проведении СМР на территориях Киргизии, Туркмении, Таджикистана, Узбекистана, Украины и Азербайджана в 1970-1980 гг. Регистрировались амплитуды смещений грунта от слабых местных землетрясений с эпицентрными расстояниями от 30 до 180 км (средний период колебаний $T_s = 0.20 \div 0.90$ с). В качестве сейсмоприемников применялись приборы ВЭИК и С-5-С, работающие с гальванометрами типа ГВ-IV-С-10. В режиме непрерывной регистрации использовался магнитоэлектрический сейсмический осциллограф ОСБ-VI с механическим приводом. Регистрация землетрясений велась с увеличением до 5000-6000. При обработке, как правило, анализировались записи амплитуд смещений поперечных S -волн.

Результаты регистрации землетрясений малых энергий на участках, сложенных песчано-глинистыми отложениями р. Карасу, рассмотрим на примере СМР г. Кара-Куль (Киргизия). Подземные воды на разных участках залегали на глубинах от 1 до 20 м (табл. 2). Опорный пункт регистрации (эталонный грунт $A_{\text{этекал}}$) располагался на скальных грунтах (песчаники, конгломераты, алевролиты со средними значениями скоростей поперечных волн $V_s = 1000-1100$ м/с). Относительно опорного пункта приращения сейсмической интенсивности (ΔI_s) составляли $1.75 \div 2.30$ балла на песчано-суглинистых отложениях с $H_{\text{УПВ}} = 1 \div 3$ м и $0.85 \div 1.15$ балла на участках с $H_{\text{УПВ}} > 10-20$ м. Вычисления проводились

² МДС 22-1.2004. Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. МДС 22-1. М.: МИИТ, 2004. 48 с. <https://files.stroyinf.ru/Data1/44/44843/>

Таблица 2. Результаты обработки записей слабых землетрясений по отношению к станции 5а, расположенной на грунтах I категории по сейсмическим свойствам (г. Кара-Куль, Киргизская ССР, 1985 г.)

Инженерно-геологическая характеристика грунтовой толщи	Категория грунтов по сейсмическим свойствам (метод ИГА)	Среднее приращение Δ/c (доверительная граница на уровне $P=0.85$) по результатам регистрации слабых землетрясений, балл	Δ/c по МСЖ, балл	Δ/c по МСЖ без учета $\Delta_{упв}$, балл	$\Delta I_{упв} = \Delta/c - \Delta_{сж}$ по результатам регистрации слабых землетрясений, балл
1	2	3	4	5	6
Станция 5б. I надпойменная терраса. Озерно-аллювиальные мягкопластичные глины с прослоями пылеватых песков. $H_{упв} = 2-3$ м	III	1.95 (± 0.17)	2.30 \div 2.35	1.45 \div 1.60	0.35 \div 0.50
Станция 2в. Конус выноса. Суглинки полутвердые и твердые с включением щебня дресвы до 30% и прослоями щебенистых грунтов. $H_{упв} = 15-20$ м	II	0.90 (± 0.23)	0.85 \div 0.90	0.85 \div 0.90	0.05
Станция 2а. Пойма р. Карасу. Переслаивание галечников (с суглинистым заполнителем до 40%), мягкопластичных суглинков и мелких песков. $H_{упв} = 1-2$ м	III	1.75 (± 0.19)	2.10 \div 2.25	1.20 \div 1.35	0.40 \div 0.55
Станция 4в. III надпойменная терраса р. Карасу. Гравийные и галечниковые отложения с суглинистым заполнителем до 30% и озерные глины полутвердые с гнездами крупного песка. $H_{упв} = 20$ м	II	0.86 (± 0.20)	0.8 \div 0.9	0.8 \div 0.9	0.06
Станция 5в. Пойма р. Карасу. На озерных мягкопластичных глинах с прослоями рыхлых пылеватых и мелких песков, супесей и суглинков залегают аллювиальные галечниковые и гравийные грунты с песчано-глинистым заполнителем до 30-40% мощностью 1-2 м. $H_{упв} = 1.0$ м	III	2.29 (± 0.31)	2.45 \div 2.55	1.6 \div 1.7	0.59 \div 0.69
Станция 3в. Пойма р. Карасу. Суглинки мягкопластичные с прослоями галечника (до 30-35% песчаного заполнителя) общей мощностью 11-15 м подстилаются озерными глинами мощностью 35-40 м. Ниже аллювиальные галечники с песчаным заполнителем. $H_{упв} = 3-4$ м	III	2.10 (± 0.20)	2.30 \div 2.40	1.70 \div 1.80	0.30 \div 0.40
Станция 3. Пойма р. Карасу. Переслаивание галечников (с суглинистым заполнителем до 30-40%), мягкопластичных суглинков, глин и мелких песков. $H_{упв} = 1-2$ м	III	2.20 (± 0.13)	2.55 \div 2.65	1.65 \div 1.75	0.45 \div 0.55
Станция 1б. III надпойменная терраса. Суглинки тугопластичные и полутвердые с включением дресвы и щебня до 10% мощностью до 20 м подстилаются галечником с суглинистым заполнителем до 25%. $H_{упв} = 10$ м	II	1.15 (± 0.09)	1.05 \div 1.20	1.05 \div 1.10	0.05 \div 0.10

Окончание таблицы 2

Инженерно-геологическая характеристика грунтовой толщи	Категория грунтов по сейсмическим свойствам (метод ИГА)	Среднее приращение ΔI_c (доверительная граница на уровне $P=0.85$) по результатам регистрации слабых землетрясений, балл	$\Delta I_{мсж}$ по МСЖ, балл	$\Delta I_{мсж}$ по МСЖ без учета $\Delta I_{упв}$, балл	$\Delta I_{упв} = \Delta I_c - \Delta I_{мсж}$ по результатам регистрации слабых землетрясений, балл
1 Станция 4б. Пойма р. Карасу. Гравийно-галечниковый грунт с суглинстым заполнителем до 25-30% залегает на озерно-аллювиальных глинах с прослоями песков, супесей, суглинков общей мощностью около 50 м. $H_{упв} = 5-7$ м	2	3	4	5	6
II Станция 7б. Дельтавно-пролювиальный шлейф. Переслаивание мягко-пластичных суглинков и глин с супесями и мелкими песками до глубины 15-20 м. Ниже озерная глина. $H_{упв} = 4$ м	II	1.35 (± 0.18)	1.33 \div 1.37	1.29 \div 1.31	0.04 \div 0.06
III Станция 5а. Коренной склон. На конгломератах и песчаниках залегают щебенчатые грунты с супесчано-суглинистым заполнителем до 20% мощностью в несколько метров	III	2.05 (± 0.07)	2.0 \div 2.1	1.75 \div 1.80	0.25 \div 0.30
I	I	0	-	-	-

$\Delta I_{мсж}$ – приращение балльности по формуле С.В. Медведова (метод сейсмических жесткостей, МСЖ) без члена приращения балльности за положение УПВ ($\Delta I_{упв}$)

по формуле, рекомендованной в РСН 65-87 и РСМ 85³:

$$\Delta I = 3.3 \lg A_i / A_{\text{этскал}}$$

Сопоставительный анализ результатов регистрации землетрясений малых энергий показал хорошую корреляцию (совпадение) с результатами исследований методами инженерно-геологических аналогий (ИГА – сравнение исследуемых грунтов с описанием грунтов в табл. 1 СП 1413330.2014) и сейсмических жесткостей, выполненных на этом же объекте (см. табл. 2). Песчано-суглинистые отложения поймы, I и II надпойменных террас с высоким уровнем залегания грунтовых вод $H_{упв} = 1 \div 3$ м по результатам инженерно-геологических исследований были отнесены к III категории по сейсмическим свойствам, а приращения ΔI по методу сейсмических жесткостей составили более 2 баллов ($\Delta I_{мсж} = 2.10 \div 2.65$ балла, см. табл. 2).

Песчано-суглинистые отложения III надпойменной террасы с $H_{упв} > 10-20$ м и полученными значениями $\Delta I_{мсж} = 0.80 \div 1.20$ балла были отнесены к грунтам II категории по результатам методов ИГА и МСЖ.

Из табл. 2 видно, что приращения сейсмической интенсивности, рассчитанные по МСЖ, несколько превышают аналогичные значения при регистрации землетрясений малых энергий (ΔI_c). Это, вероятно, связано с тем, что приращения балльности в МСЖ с поправкой $\Delta I_{упв}$ рассчитывались согласно ф. (1), где коэффициент K в песчано-суглинистых грунтах принимался равным 1.

Аналогичные закономерности были прослежены на других объектах СМР (города Пржевальск, Рыбачье, Кок-Янгак, Майлисай; поселки на северном побережье оз. Иссык-Куль в Киргизии; поселки Фирюза и Чули в Туркмении; г. Ужгород в Украине; г. Кайраккум в Таджикистане; объекты на Апшеронском п-ове в Азербайджане, “Забайкальский апатитовый комбинат” возле г. Улан-Удэ), грунтовые условия которых представлены четвертичными песками от крупных до пылеватых рыхлых и плотного сложения, глинами и суглинками от мягкопластичных до полутвердых и твердых с щебнем и галькой до 15-20%. По результатам обработки записей слабых землетрясений на этих объектах были рассчитаны обобщенные диапазоны изменения значений $\Delta I = 0.25 \div 0.60$ балла при $H_{упв} > 6-7$ м и $\Delta I = 0.95 \div 1.60$ балла при $H_{упв} = 1-4$ м относительно эталонных (средних) грунтов II категории по

³ РСМ-85. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях в строительстве. М. Госстрой СССР, 1985. 72 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743852.htm>

сейсмическим свойствам с параметрами $V_s=280-350$ м/с и $\rho=1.7-1.8$ г/см⁴.

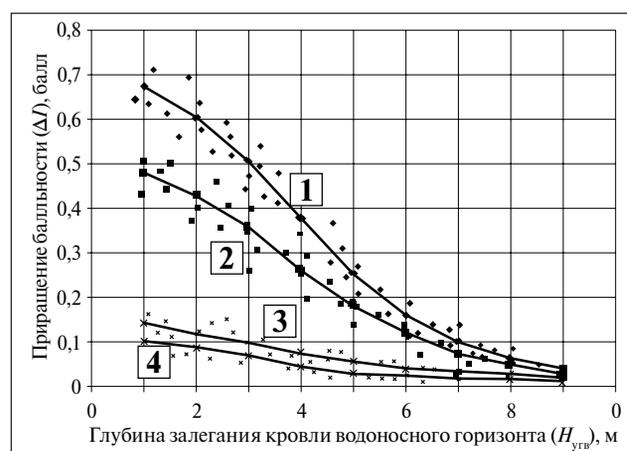
Даже при пересчете полученных значений приращений сейсмической интенсивности по новой зависимости, приведенной в п. 8.2.13 СТО 95 12022-2017⁵ для оценки ΔI по записям амплитуд смещений слабых землетрясений, получим округленные значения $\Delta I=0.10\div 0.30$ балла при $H_{\text{УПВ}} > 6-7$ м и $\Delta I=0.40\div 0.75$ балла при $H_{\text{УПВ}}=1-4$ м относительно средних грунтов II категории по сейсмическим свойствам (реперные грунты).

Результаты исследований, проведенные авторами при регистрации слабых землетрясений на обводненных дисперсных грунтах, показывают, что при СМР следует проводить оценку влияния обводнения на изменения приращения сейсмической интенсивности в методе сейсмических жесткостей. Проанализировав имеющиеся данные, были построены графики зависимости приращения сейсмической интенсивности ($\Delta I_{\text{УПВ}}$) от глубины залегания УПВ при разных значениях скоростей V_s (рисунок). Для этого в каждом конкретном случае из значений ΔI_c , полученных по записям слабых землетрясений, вычитались значения $\Delta I_{\text{МСЖ}}$ за сейсмическую жесткость, установленные по результатам сейсмоакустических исследований ($\Delta I_{\text{УПВ}} = \Delta I_c - \Delta I_{\text{МСЖ}}$). При этом член в формуле С.В. Медведева за наличие резонанса ($\Delta I_{\text{рез}}$) не учитывался, так как на рассмотренных объектах глубина залегания кровли грунтов I категории по сейсмическим свойствам превышает 40 м. Полученные таким образом значения $\Delta I_{\text{УПВ}}$ использовались при построении графиков.

Повышенная степень повреждения зданий и сооружений, зафиксированная при сильных землетрясениях на участках распространения дисперсных грунтов и с высоким положением УПВ, может быть связана с интенсивной вертикальной компонентой сейсмических колебаний. Этот эффект наиболее вероятен в эпицентральных зонах сильных землетрясений, где вертикальная компонента может быть не меньше горизонтальной. Анализ инструментальных записей сильных землетрясений, проведенный Ф.Ф. Аптикаевым [3], показал, что при максимальных амплитудах на горизонтальной составляющей менее 250 см/с² амплитуда вертикальной составляющей ускорений колебаний в среднем вдвое меньше. При больших значениях амплитуд ускорений они начинают сближаться.

А при ускорениях более 800 см/с² вертикальная составляющая начинает превышать горизонтальную. В этих условиях водонасыщенный дисперсный грунт, вероятно, может передавать интенсивные вертикальные сейсмические колебания без значительного демпфирования непосредственно на фундаменты зданий и сооружений. С.В. Медведев [7] отмечал, что увеличение сейсмической интенсивности в водонасыщенных грунтах в некоторой мере может быть связано с эффектом, родственным гидравлическому удару. Его предположение основывалось на наблюдаемых при землетрясениях грязевых извержениях в пльвунах и водонасыщенных грунтах, покрытых тонкой коркой твердого суглинка. Эти явления наблюдались при землетрясениях 2.11.1946 г. (г. Наманган) и 6.10.1948 г. (г. Ашхабад).

Результаты исследования авторов на слабых песчано-глинистых грунтах показывают, что не следует полностью отказываться от поправки ($\Delta I_{\text{УПВ}}$) в эмпирической зависимости С.В. Медведева [7, 8] при расчетах в МСЖ по скоростям поперечных волн. По мнению авторов, при СМР на плотных песках и глинистых грунтах от тугопластичной до твердой консистенций по методу сейсмических жесткостей $\Delta I_{\text{УПВ}}$ можно не учитывать. На песчано-глинистых грунтах III категории по сейсмическим свойствам (рыхлые, средней плотности пылеватые, мелкие, средние пески и все глинистые грунты от мягкопластичной до текучепластичной консистенций, залегающие ниже УПВ) изменение сейсмического эффекта от землетрясения при обводнении следует принять равным $\Delta I_{\text{УПВ}} = Ke^{-0.04h^2}$, где коэффициент K не может быть более 0.6. Величина коэффициента K в ф. (1) может быть уточнена при проведении дальнейших исследований.



Графики зависимости приращений сейсмической интенсивности ($\Delta I_{\text{УПВ}}$) от глубины залегания УПВ при разных значениях скоростей V_s по результатам анализа записей слабых землетрясений (регистрировалась амплитуда смещений). Средние значения V_s (м/с) для графиков соответствуют: 1 — 150-200; 2 — 250-300; 3 — 350-500; 4 — 600-800.

⁴ РСН 65-87. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: Стройиздат, 1986. 32 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854919.htm>
⁵ СТО 95 12022-2017 Стандарт Госкорпорации «Росатом». Сейсмическое микрорайонирование. Общие требования. М., 2017. 42 с. http://sro-atomgeo.ru/wp-content/uploads/file/3GEO/Documents/Standarts/2017/STO_Seismika_Geo_2017.pdf

Наряду с определением $\Delta I_{упв}$ в водонасыщенных дисперсных грунтах для оценки ухудшения их сейсмических свойств при СМР следует учитывать результаты других процессов, которые могут проявляться на грунтах IV категории по сейсмическим свойствам. Сейсмические воздействия более 7 баллов приводят к изменению первоначального состояния динамически неустойчивых разностей этих грунтов. К таким явлениям относятся нелинейные процессы (большие остаточные деформации), с которыми связано рассеивание и поглощение энергии упругих волн, что особенно заметно при обводнении массива.

На динамически неустойчивых (слабых) грунтах разрушения в зданиях и сооружениях могут быть обусловлены не только уровнем сейсмических колебаний, но и потерей несущей способности грунтов в процессе землетрясения: их оседанием, просадками, осадками в результате разжижения, уплотнения, течения (как, например, при землетрясениях в городах Ниигата, Кобе (Япония) в 1964 и 1995 гг., Мехико в 1985 г.).

Другое явление, которое следует учитывать при оценке сейсмических воздействий и может проявляться на поверхности динамически неустойчивых грунтов, связано с возможным усилением уровня колебаний за счет влияния резонансных явлений. Таким примером может служить землетрясение в Чи-Чи 21.09.1999 г. на Тайване [10].

Для более надежных расчетов по обеспечению безопасности зданий и сооружений, возводимых на динамически неустойчивых грунтах, следует получать сведения о сейсмических параметрах в слоях грунтов и пород до той глубины, где располагается граница с $V_s > 700-800$ м/с [9]. Это связано с оценкой возможного проявления разнонаправленных тенденций по снижению амплитудного уровня колебаний в результате нелинейных процессов в грунтах и увеличением амплитудного уровня колебаний в результате резонансных явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении СМР на водонасыщенных плотных песках и глинистых грунтах от тугопластичной до твердой консистенций по методу сейсмических жесткостей $\Delta I_{упв}$ можно не учитывать.

На песчано-глинистых грунтах III категории по сейсмическим свойствам (водонасыщенные рыхлые, средней плотности пылеватые, мелкие и средние пески и глинистые грунты от мягкопластичной до текучепластичной консистенций) изменение сейсмического эффекта от землетрясения при обводнении следует принять равным $\Delta I_{упв} = Ke^{-0.04h^2}$, где коэффициент K не может быть более 0.6.

При проведении СМР на водонасыщенных динамически неустойчивых дисперсных грунтах IV категории следует учитывать, что:

- при средних и сильных землетрясениях из-за влияния нелинейных процессов амплитудный уровень колебаний может значительно снижаться;
- при наличии в разрезе слоев с резким различием сейсмической жесткости и проявлении в связи с этим резонансных явлений амплитудный уровень колебаний может значительно увеличиваться;
- при строительстве зданий и сооружений на неустойчивых дисперсных грунтах необходимо не только оценивать потенциальную опасность от ожидаемых амплитудно-частотных воздействий вероятных сильных землетрясений, но также следует предусматривать инженерные мероприятия по усилению грунтов оснований.

Источник финансирования. *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № г.р. ААА-А-19-119021190077-6.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешин А.С.* Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
2. *Алешин А.С.* Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 301 с.
3. *Антикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности (ГОСТ Р57546-2017). М.: Наука и образование, 2012.
4. *Баркан Д.Д., Трофименков Ю.Г., Голубцова М.Н.* Влияние свойств грунтов оснований при расчете сооружений на сейсмическое воздействие // Свойства грунтов при вибрациях. Ташкент: ФАН, 1975. С. 55-69.
5. *Кригер Н.И., Алешин А.С., Кожевников А.Д.* и др. Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. М.: Наука, 1980. 96 с.
6. *Максимов А.Б.* О реакции грунтов на интенсивные колебания // Вопросы инженерной сейсмологии. 1973. № 10. С. 50-62.
7. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 284 с.
8. *Медведев С.В.* Оценка сейсмической балльности в зависимости от грунтовых условий // Тр. Геофиз. ин-та. 1952. № 14. С. 29-52.
9. *Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Рагозин Н.А.* Особенности реакции слабых водонасыщенных грунтов на динамические воздействия при землетрясениях // Геоэкология. 2014. №5. С. 387-401.

10. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 257с.
11. Хачиян Э. Прикладная сейсмология. Ереван: Гитутюн, 2008. 491 с.
12. Reid H.F. The Mechanics of the Earthquakes. The Californian Earthquake of April 18, 1906 // Rep. of the State Investigation Commission, V. 2. Pt. 1. Carnegie Inst. of Washington. 1910. 56 p.
13. Sieberg A. Die Erdbeben // Handbuch der Geophysik. Berlin, 1930. V. 4. P. 527-686.
6. Maksimov, A.B. *O reaktsii gruntov na intensivnye kolebaniya* [Soil response to intense vibration]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 1973, no. 10, pp. 50-62.
7. Medvedev, S.V. *Inzhenernaya seismologiya* [Engineering seismology]. Moscow, Gosstroizdat, 1962, 284 p.
8. Medvedev, S.V. Otsenka seimsicheskoi ball'nosti v zavisimosti ot gruntovykh uslovii [Assessment of seismic intensity depending on ground conditions]. Proc. Geophysical Institute, 1952, no. 14, pp. 29-52.
9. Mindel', I.G., Trifonov, B.A., Sevost'yanov, V.V., Ragozin, N.A. *Osobennosti reaktsii slabyykh vodonasychennykh gruntov na dinamicheskie vozdeistviya pri zemletryakh* [Specific response of weak water-saturated soils to dynamic impact upon earthquakes]. *Geokologiya*, 2014, no. 5, pp. 387-401

REFERENCES

1. Aleshin, A.S. *Seismicheskoe mikroraiirovanie osobo otvetstvennykh ob'ektov* [Seismic microzoning of highly responsible objects] Moscow, Svetoch Plyus, 2010, 304 p. (in Russian)
2. Aleshin, A.S. *Kontinual'naya teoriya seismicheskogo mikroraiirovaniya* [Continual theory of seismic microzoning]. Moscow, Nauchnyi mir, 2017, 301 p.
3. Aptikaev, F.F. *Instrumental'naya shkala seismicheskoi intensivnosti GOST R 57546-2017* [Instrumental scale of seismic intensity GOST R 57546-2017]. Moscow, Nauka i obrazovanie, 2012.
4. Barkan, D.D., Trofimenkov Yu.G., Golubtsova M.N. Influence of foundation soils properties in engineering structures calculation for seismic impact. *Svoistva gruntov pri vibratsiyakh* [Soil properties on vibrations]. Tashkent, FAN, 1975, pp. 55-69
5. Kriger, N.I., Aleshin, A.S., Kozhevnikov, A.D., et al. *Seismicheskie kharakteristiki lessovykh porod v svyazi s geologicheskim okruzheniem i tekhnogenezom* [Seismic characteristics of loess soils in relation to geological surroundings and technogenesis]. Moscow, Nauka, 1980, 96 p.
10. Pavlenko, O.V. *Seismicheskie volny v gruntovykh sloyakh: nelineinoe povedenie grunta pri sil'nykh zemletryasenyakh poslednikh let* [Seismic waves in soil layers: nonlinear behavior of soil upon recent strong earthquakes]. Moscow, Nauchnyi mir, 2009, 257 p.
11. Khachian E. *Applied Seismology*. Yerevan, "Gitutyun" publischer NAS RA, 2008, 491 p.
12. Reid, H.F. *The mechanics of the earthquakes*. The Californian earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commission. The Carnegie Inst. Washington, vol. 2, Pt. 1, 1910. 56 p.
13. Sieberg, A. Die Erdbeben. *Handbuch der Geophysik*, 1930, vol. 4, Berlin, pp. 527-686.

EVALUATION OF SEISMIC PROPERTIES OF WATER-SATURATED SOILS FOR SOLVING PROBLEMS IN SEISMIC MICROZONING

© 2019 B. A. Trifonov^{1*}, V. V. Sevostyanov¹, S. Yu. Milanovskiy², V. V. Nesynov¹¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

*E-mail: igelab@mail.ru

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya ul., 10-1, Moscow, 123242 Russia

The experts involved in seismic microzoning (SMZ) have different opinions on whether to take into account the response of water-saturated fine soils upon the assessment of expected seismic effect. When using the method of seismic stiffness (MSS), a number of researchers consider inexpedient to apply the correction for the groundwater level (GWL). In the present paper, we analyze both the results of our own field studies and those of other researchers involved in the development of SMZ methodology. Particular attention is paid to the GWL influence on the increment of seismic intensity (ΔI_{GWL}) in the S.V. Medvedev's equation upon MSS calculations by transverse s-waves. The research results provided in this paper prove that the correction for ΔI_{GWL} should not be ignored in calculations of the seismic intensity increment. The authors appear it expedient to continue field tests in the registration of strong movements in water-saturated fine soils.

Keywords: seismic intensity, fine soils, water content of soils, amplification of seismic intensities, seismic microzoning, method of seismic stiffness.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019574-81>