

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Скляр А.М.,

Пустовитенко Б.Г., Скляр А.А., Кязева В.С., Останин А.М.

Институт сейсмологии и геодинамики КФУ им. В.И. Вернадского
г. Симферополь

АННОТАЦИЯ: Проведено аналіз результатів сейсмічного мікрорайонування (СМР) методами вибухів і мікросейсм на території хвостосховища Північного ГЗК. Встановлена просторова неоднорідність варіацій приращення сейсмічної інтенсивності ΔI на території, пов'язана з особливостями інженерно-геологічних властивостей ґрунтів у верхній 50-метровій товщі порід. Отримані прямий зв'язок ΔI з потужністю пухких піщано-глинистих відкладень і висока кореляція ΔI за різними методами СМР.

АННОТАЦИЯ: Проведен анализ результатов сейсмического микрорайонирования (СМР) методами взрывов и микросейсм на территории хвостохранилища Северного ГОК. Установлена пространственная неоднородность вариаций приращения сейсмической интенсивности ΔI на территории, связанная с особенностями инженерно-геологических свойств грунтов в верхней 50-метровой толще пород. Получены прямая связь ΔI с мощностью рыхлых песчано-глинистых отложений и высокая корреляция ΔI по разным методам СМР.

ABSTRACT: The analysis of seismic microzoning results by methods of explosions and microseisms for the territory of the tailing dump of Severniy mining plant has been carried out. Spatial heterogeneity of variation of the seismic intensity increment ΔI within the territory due to the peculiarities of engineering-geological properties of soils in the upper 50 m strata of rock has been found. Direct link of ΔI with the thickness of loose sandy-clay deposits and the high correlation between ΔI by different methods of seismic microzoning has been obtained.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическое микрорайонирование, приращение сейсмической интенсивности, метод взрывов, метод микросейсм.

ВВЕДЕНИЕ

Локальные инженерно-геологические свойства грунтов оказывают существенные влияния на пространственные вариации сейсмических воздействий, вызванных землетрясениями тектонической и техногенно-индуцированной природы. Задача корректного учета этих вариаций при проектировании, строительстве и эксплуатации особо ответственных и экологически опасных объектов строительства является актуальной и жизненно необходимой для предотвращения и/или смягчения тяжелых экологических и социально-экономических последствий. К таким экологически опасным объектам относятся, в частности, хвостохранилища крупных горно-обогатительных комбинатов (ГОК).

В 2010 г. Отделом сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины были проведены комплексные исследования по уточнению сейсмической опасности с учётом локальных инженерно-геологических условий территории размещения основных ограждающих сооружений хвостового хозяйства и оборотного водоснабжения Северного горно-обогатительного комбината, расположенного в районе г. Кривой Рог (Северный ГОК) для расчета устойчивости защитных сооружений хвостохранилища [1].

Учитывая сложность и пространственную неоднородность инженерно-геологических свойств грунтов на территории расположения объекта, основное внимание в данной статье уделено сравнительному анализу вариаций количественных оценок приращения сейсмической интенсивности, полученных инструментальными методами сейсмического микрорайонирования (СМР).

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок размещения ограждающих сооружений хвостохранилища Северного ГОКа относится к сложным и неоднородным по инженерно-геологическим условиям и сейсмическим свойствам грунтов в верхней сорокаметровой толщии пород [1]. По принадлежности к различным геоморфологическим элементам, по геолого-генетическим признакам и физико-механическим свойствам грунтов в пределах этой территории выделено несколько крупных районов и зон (рис. 1).

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие докембрийские метаморфические и интрузивные породы Украинского щита, перекрытые осадочными отложениями кайнозоя мощностью от 10 до 56 м. По физико-механическим свойствам пород верхней сорокаметровой части геологического разреза, принимаемой во внимание при

сейсмическом микрорайонировании гидротехнических сооружений [2], в пределах участка работ (рис. 1) выделяются три квазиоднородных района (А, Б, В).

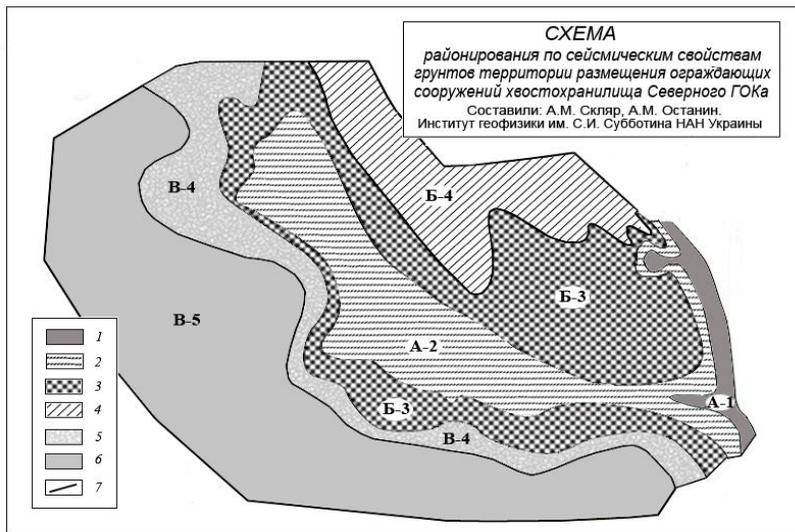


Рис.1. Схема районирования территории ограждающих сооружений хвостохранилища Северного ГОКа по категориям сейсмических свойств грунтов: 1, 2 – I; 3, 4 – II; 5, 6 – II-III категории; 7 – границы районов

По мощности рыхлых отложений, перекрывающих граниты в пределах района «А» выделены 2 зоны: А-1 – с мощностью рыхлых отложений $H \geq 10$ м и А-2 – с мощностью $H =$ от 10...20 м. В целом, рассмотренный разрез в пределах днища балок в интервале 0,0...40,0 м характеризуется преобладанием грунтов I категории по сейсмическим свойствам.

Район «Б» охватывает значительную часть территории хвостохранилища и характеризуется преобладанием в геологическом разрезе (до глубины 40 м) грунтов II категории по сейсмическим свойствам. В пределах района «Б» по мощности песчано-глинистых отложений H , перекрывающих граниты, выделены зоны: Б-3 – с $H = 20...30$ м и Б-4 – с $H = 30$ до 40 м. В целом геологический разрез района «Б» до глубины 40 м сложен преимущественно грунтами II категории.

Район «В» охватывает всю западную и юго-западную часть основания дамб хвостохранилища СевГОКа (рис. 1). Характеризуется значительной мощностью (50 м и более) песчано-глинистых отложений кайнозоя, залегающих в виде линзовато-слоистой толщи песков, глин и

суглинков. По мощности песчано-глинистых отложений, перекрывающих граниты, в пределах района «В» выделены 2 зоны: **В-4** с $H = 30...40$ м и **В-5** с $H = 40...60$ м при относительно равном соотношении грунтов **II** и **III** категории по сейсмическим свойствам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Учитывая пространственную неоднородность инженерно-геологического строения района работ сейсмическое микрорайонирование (СМР) проведено с большой детальностью по всей площади с применением комплекса методов, включавших: регистрацию специальных взрывов, высокочастотных микросейсм и сейсморазведочные наблюдения (метод сейсмических жесткостей) [1].

Метод взрывов относится к основным методам СМР, но он редко применяется в связи с большими финансовыми затратами и невозможностью проведения взрывов вблизи населенных пунктов. Метод микросейсм вспомогательный [3], но вполне доступный и широко распространенный в последнее время в практике СМР. В связи с этим проведем анализ сопоставимости результатов СМР только по двум этим методам.

Метод регистрации взрывов основан на подобию волновой картины, возникающей при слабых землетрясениях и взрывах и, по существу, является наиболее корректным подходом к имитации ожидаемых сильных воздействий для территорий с большим периодом повторяемости местных сейсмических событий [4].

При проведении полевых наблюдений сейсмометры устанавливались в трех взаимно перпендикулярных направлениях: восток-запад (**EW**), север-юг (**NS**) и вертикальном (**Z**). За время работы зарегистрировано 8 массовых промышленных взрывов (масса заряда от 104 до 727 тонн) в 23 пунктах наблюдений, охватывающих все инженерно-геологические условия исследуемой территории.

По форме и продолжительности записи взрывов из различных карьеров заметно различаются между собой, что обусловлено техническими условиями производства взрывов (количество и время замедлений, масса одновременно взрываемых взрывных веществ) и расстояниями до пунктов регистрации.

Для максимального исключения влияния среды на затухание сейсмических волн вдоль трасс схема наблюдений выбрана таким образом, чтобы расстояние между пунктами наблюдений и пунктами взрывов не превышало 15%.

В качестве эталонных использовались записи взрывов в пункте, расположенном на грунтах **I** категории по сейсмическим свойствам, представленными докембрийскими гранитами Украинского щита.

В основе **метода регистрации микросейсм** лежит представление о грунте, как о некотором «фильтре», выделяющем из микросейсмического поля колебания определенного частотного диапазона с амплитудным уровнем, зависящем от инженерно-геологических условий в пункте наблюдения. Важной особенностью исследований в районе с наличием многочисленных источников микроколебаний с различными мощностями и характером воздействий явилось изучение условий обеспечения максимально возможной стандартизации наблюдений.

В качестве эталонных приняты записи микросейсм в пункте, расположенном на грунтах **I** категории по сейсмическим свойствам, совмещенном с эталонным пунктом регистрации взрывов. Дополнительно для метода микросейсм использован также эталонный пункт, расположенный на грунтах **II** категории. Использование для оценки ΔI двух эталонных пунктов обусловлено необходимостью обеспечения стандартности наблюдений в условиях большой протяженности исследуемой территории и наличии в ее пределах значительного количества неравномерно распределенных источников техногенных помех.

Всего зарегистрировано и обработано 102 трехкомпонентные записи микросейсм, часть из них получена в пунктах, совмещенных с записью взрывов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам инженерно-геологических и инструментальных сейсмологических исследований (табл. 1) в пределах территории размещения ограждающих сооружений хвостохранилища Северного ГОКа выделяются три зоны с приращениями сейсмической интенсивности, округленно составляющими: $\Delta I = -1,0$; 0 и $+1,0$ балл относительно исходной сейсмичности.

В таблице представлены вариации ΔI полученные методом взрывов ($\Delta I_{\text{взр}}$) и микросейсм ($\Delta I_{\text{микр}}$) и их средние значения по двум методам ($\Delta I_{\text{ср}}$), как по всей совокупности данных на квазиоднородных участках, так и по данным совмещенных пунктов регистрации. Средние значения по группе пунктов даны в пределах как метода, так и двух методов. Осреднение проводилось по всем пунктам регистрации (n) на территории отдельных зон (А-В, дамба).

Таблица 1

Приращение сейсмической интенсивности по методу взрывов и микросейсм для инженерно-геологических условий территории хвостохранилища Северного ГОКа

Зона, <i>H</i> , м	<i>Все пункты</i>				<i>Совмещенные пункты</i>				
	$\Delta I_{\text{взр}}$	n	$\Delta I_{\text{микр}}$	n	$\Delta I_{\text{сп1}}$	$\Delta I_{\text{взр}}$	$\Delta I_{\text{микр}}$	$\Delta I_{\text{сп2}}$	n
А-1 ≤ 10	-0.76 (0.07)	3	-0.63 (0.08)	3	-0.69 (0.06)	-0.73 (0.08)	-0.57 (0.06)	-0.65 (0.08)	2
А-2, 10-20	+0.23 (0.03)	3	+0.16 (0.05)	7	+0.20 (0.03)	+0.23	+0.34	+0.28 (0.06)	1
Б-3, 20-30	+0.42 (0.05)	10	+0.24 (0.05)	9	+0.33 (0.09)	++0.37 (0.04)	+0.28 (0.04)	+0.33 (0.05)	5
Б-4, 30-40	+0.78 (0.14)	8	+0.62 (0.11)	23	+0.70 (0.08)	+0.71 (0.07)	+0.69 (0.11)	+0.70 (0.01)	4
В-4, 30-40	+0.82 (0.11)	4	+0.67 (0.12)	17	+0.75 (0.08)	+0.82 (0.11)	+0.58 (0.06)	+0.70 (0.12)	2
В-5, 40-50	+0.98 (0.15)	7	+0.97 (0.15)	22	+0.98 (0.01)	+1.01 (0.13)	+0.94 (0.08)	+0.98 (0.04)	4
Дамба	+1.34 (0.05)	6	+1.16 (0.14)	18	+1.25 (0.09)	+1.32 (0.05)	+1.30 (0.07)	+1.31 (0.01)	4

Из табл. 1 видно, что отрицательные приращения сейсмической интенсивности соответствуют только площадям развития рыхлых отложений мощностью до 10 м, подстилаемых кристаллическими породами Украинского щита (грунты *I* категории по сейсмическим свойствам в зоне А-1). Близкие к нулевым приращениям сейсмической интенсивности ($\Delta I_{\text{сп1}} = +0,20 \dots +0,33$) характеризуется территория, сложенная песчано-глинистыми отложениями кайнозой мощностью *H* = 10...30 м, залегающими на коренных докембрийских гранитах (зоны А-2, Б-3).

Для территории с песчано-глинистыми отложениями мощностью от 30 до 50 м приращения сейсмической интенсивности составляют: $\Delta I_{\text{сп1}} = +0,70 \dots +0,98$ балла (зоны Б-4, В-4 и В-5).

Для ограждающих дамб хвостохранилища, сложенных техногенными отложениями, приращения сейсмической интенсивности составляют $\Delta I_{\text{сп1}} = +1,25$ балла относительно исходной сейсмичности.

Отдельно сравним ΔI , полученные на совмещенных пунктах регистрации, для исключения ошибок за счет возможных пространственных особенностей внутри квазигомогенных зон. В большинстве случаев $\Delta I_{\text{сп2}}$ на совмещенных пунктах либо полностью совпали с $\Delta I_{\text{сп1}}$,

либо их значения находились в пределах разброса данных как внутри метода, так и между ними.

В целом наблюдается тесная корреляционная связь между значениями ΔI по основному (взрывы) и вспомогательному (микросейсм) методам (рис. 2).

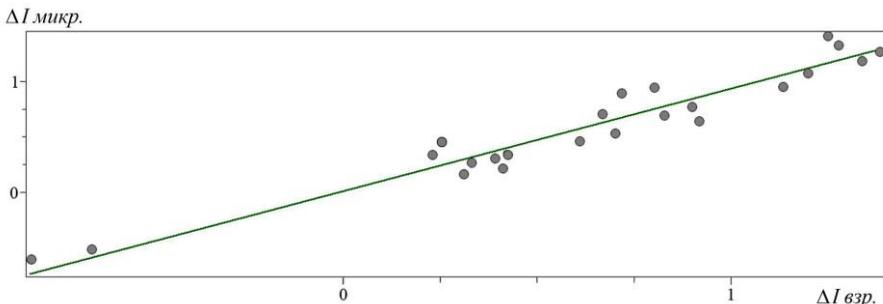


Рис. 2. Корреляционная связь ΔI по методу взрывов и микросейсм

Эта связь аналитически описывается уравнением прямой, полученной методом ортогональной регрессии по 22 парам независимых определений с коэффициентом корреляции $\rho = 0,97$:

$$\Delta I_{\text{микр.}} = (0,92 \pm 0,05) \Delta I_{\text{взр.}} + (0,01 \pm 0,04). \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что при $\Delta I_{\text{взр.}} = 1$ приращение ΔI по методу микросейсм с учетом погрешностей может находиться в пределах 0,86...1,01 (при максимальном разбросе ошибок в обе стороны). Отсюда следует, что оба метода являются равноточными и равнозначными.

Анализ полученных данных показал, что для записей микросейсм, также как и для записей взрывов, наблюдается возрастание амплитудного уровня колебаний с увеличением мощности рыхлых отложений. При мощности песчано-глинистых отложений $H \geq 30$ м приращение сейсмической интенсивности превышает принятое в СМР пороговое значение $\Delta I = +0,5$ балла. Для участков с мощностью рыхлых отложений до 10 м приращение сейсмической интенсивности составляет $\Delta I \sim -1$ балл.

Зависимость средних значений приращения сейсмических интенсивностей ΔI от мощности слоя песчано-глинистых отложений H для всей рассмотренной территории Северного ГОКа можно представить в виде уравнения прямой с высоким коэффициентом корреляции ρ :

$$\Delta I = (0,041 \pm 0,004)H - (0,78 \pm 0,14), \quad \rho = 0,97.$$

Влияние факторов «категория грунтов по сейсмическим свойствам» и «глубина залегания уровня грунтовых вод» на интенсивность микроколебаний менее выражено и прямой корреляционной связи не установлено. Это подтверждается незначительными различиями в приращениях сейсмической интенсивности для инженерно-геологических участков: **А-2** ($\Delta I_{\text{ср}} = +0,20$) и **Б-3** ($\Delta I_{\text{ср}} = +0,33$), относящихся, соответственно, к грунтам **I** и **II** категории; **Б-4** ($\Delta I_{\text{ср}} = +0,70$ балла) и **В-4** ($\Delta I_{\text{ср}} = +0,75$ балла) – для грунтов **II** и **II-III** категории, соответственно. Изменение глубины залегания уровня грунтовых вод в пределах от $H_{\text{УГВ}} = 1$ м до $H_{\text{УГВ}} = 10,5$ м, также слабо отразилось на вариациях ΔI для пунктов наблюдений методом акустических жесткостей: ($\Delta I = +0,42$) и ($\Delta I = +0,32$), соответственно [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлена пространственная неоднородность вариаций приращения сейсмической интенсивности ΔI на территории хвостохранилища Северного ГОКа, связанная с особенностями инженерно-геологических свойств грунтов в верхней 50-метровой толще пород. Получена тесная корреляционная связь между мощностью рыхлых песчано-глинистых отложений и значениями ΔI .

Сравнительный анализ двух методов: основного (взрывы) и вспомогательного (микросейсмы) показал хорошую сходимость результатов по оценке ΔI . Оба метода можно отнести к равноточным и равноправным при проведении работ по СМР. В связи с этим, метод микросейсм можно также принять основным для широкого использования в практических задачах инженерной сейсмологии, в том числе при изысканиях на площадках строительства ответственных и экологически опасных объектов, где метод взрывов по разным причинам может быть недоступен.

Полученные количественные значения ΔI на исследуемой территории хвостохранилища Северного ГОКа показали, что метод инженерно-геологических аналогий по категории грунтов не отражает реальную картину вариаций сейсмической интенсивности и его применение [5, табл. 5.1] должно быть ограничено для избежания неверных оценок расчетной сейсмичности площадок строительства объектов различного назначения и степени ответственности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр А.М., Князева В.С., Останин А.М. и др. Сейсмическое микрорайонирование территории расположения ограждающих сооружений хвостового хозяйства и оборотного водоснабжения ОАО «СевГЭК», Отчет по теме, Фонды ИГФ НАНУ, Симферополь – Киев, 2010. – 75 с.
2. Методические рекомендации по составу и методике оценки сейсмических и геодинамических условий действующих энергетических объектов с использованием геоинформационных технологий. – М., 1998. – 117 с.
3. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства / Под ред. С.А.Федорова. - М: Госстрой СССР, 1985. – 136 с.
4. Меметова Н.С. Особенности динамических характеристик сейсмических волн промышленных взрывов / Меметова Н.С., Пустовитенко Б.Г. // Сейсмологический бюллетень западной зоны системы сейсмических наблюдений Украины и Молдовы за 1990 год. – К.: Наукова думка, 1994. - С.180-187.
5. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014 / науковий керівник Ю.І. Немчинов. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. – VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).

REFERENCES

1. Sklyar A. M., Knyazeva V. S., Ostanin A. M., et al. Seismic microzoning of the location of enclosing constructions of tail facility and recycling water supply JSC "SevGOK", Report on the subject, Foundations of Geophysics Institute of NAS of Ukraine, Simferopol – Kyiv, 2010, 75 p.
2. Methodical recommendations for content of and the methodology for the evaluation of seismic and geodynamic conditions of existing power facilities using GIS technology. – М., 1998. 117 p.
3. Recommendations on seismic microzoning for engineering surveys for construction. (Edited by S. A. Fedorov. - М: Gosstroy of the USSR, 1985. – 136 p.
4. Memetova N.S., Pustovitenko B.G. (1994). Osobennosti dynamicheskikh karakteristik sejsmicheskikh voln promushlennuh vzrUVov [Features of dynamic characteristics of seismic waves from industrial explosions] // Seismological Bulletin of the Western zone of the system of seismic observations of Ukraine and Moldova for 1990. - Kiev: Naukova Dumka, P. 180-187.
5. Budivnutstvo v seismichnuh rajonah Ukrainu [Construction in seismic regions of Ukraine]. (2014). DBN V. 1.1–12: 2006 Resp. editor J. I. Nemchinov. – Kyiv: State building norms of Ukraine [in Ukrainian].

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г.