

УДК 550.394

DOI 10.21661/r-114245

*С.П. Серебренников, В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, Е.В. Брыжак*

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

*Аннотация:* реализуется подход, основанный на анализе основных количественных характеристик колебаний грунтов при сильных землетрясениях, необходимых при районировании сейсмической опасности земляных плотин. В методологическом аспекте весь процесс подготовки районирования техногенной опасности сооружений включает ряд этапов, общий для земляных плотин. Результаты исследований основаны на изучении сейсмической опасности сооружений на территории Монголии, Амурской области и Хабаровского края.

*Ключевые слова:* земляные плотины, сейсмические воздействия, ускорения, землетрясения, сейсмо-грунтовые модели.

*S.P. Serebrennikov, V.I. Dzhurik, A.Yu. Eskin, E.V. Bryzhak*

## SEISMIC HAZARD ASSESSMENT OF THE EARTH DAMS UNDER STRONG EARTHQUAKES

*Abstract:* the assessment approach is based on the analysis of main quantitative characteristics of strong ground motions required for the construction of earth dams in seismic zones. Methodologically, the approach to provide for appropriate zoning for hazardous industries involves conducting a process that consists of several stages typical for earth dams. The results of research are based on seismic hazard assessment for the facilities in Mongolia, Amur Region and Khabarovsk Territory.

*Keywords:* earth dams, seismic effects, accelerations, earthquakes, models of seismic ground motions.

В статье представлен анализ основных количественных характеристик колебаний грунтов необходимых при районировании техногенной опасности земляных плотин. Результаты исследований основаны на изучении сейсмической

опасности сооружений на территории Монголии, Амурской области и Хабаровского края. Рассматриваемые объекты входят в состав производственных элементов при горно-обогатительных фабриках и ТЭЦ. В методологическом аспекте весь процесс подготовки районирования техногенной опасности сооружений включает ряд этапов, общий для земляных плотин.

На первом этапе проанализированы и собраны основные сейсмологические данные. В результате анализа рассмотрены пределы, в которых могут меняться параметры сильных землетрясений из выделенных зон ВОЗ (вероятных очагов землетрясений), расположенных на территории существующих, модернизируемых и проектируемых земляных плотин. Они имеют следующие интервалы: эпицентральное расстояние 0–100 км, магнитуда 6,0–7,9, интенсивность в баллах 8, глубина очагов 15–20 км, механизм очагов – сдвиг и взбросо-сдвиг.

Второй этап технологический и самый информативный в процессе районирования техногенной опасности исследуемых плотин. Сейсмозондирование районов эксплуатации и строительства объектов методами малоглубинной геофизики отработаны и опубликованы [3–5].

Точки сейсмозондирований выбирались с учетом равномерного охвата типичных грунтовых условий района расположения конкретного объекта исследований. Всего выполнено и проанализировано более 400 зондирований. Участки плотин характеризуются различными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, что и отражается на волновой картине зарегистрированных сейсмограмм.

В результате их интерпретации оценивались значения скоростей сейсмических волн. Анализ последних подтверждает широкие пределы их изменения в рыхлых породах от аномально низких 280–500 м/с (в слое до 3 м) до 600–800 м/с и более – ниже этого слоя. На бортах плотин скорости могут увеличиваться до 2000 и более м/с, это объясняется наличием разрушенных и относительно сохранных коренных пород, даже при их неглубоком залегании. Ре-

зультаты определения скоростей в конкретных точках зондирований приводятся в табличной форме или в виде гистограмм для рыхлых и коренных пород в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии.

Рыхлые воздушносухие грунты, объединены в одну группу без учета их состава, скорости в них меняются от 500 до 1200 м/с. Мощность слоя рыхлых грунтов может меняться от 5–10 до 30 и более метров. Максимумы распределений приходятся на интервалы скоростей 600–700 м/с и 1000–1100 м/с, это свидетельствует о наличии двух распределений. Первое из них, соответствует рыхлым отложениям с преобладанием относительно мелкой фракции, а второе можно отнести к крупнообломочным и разрушенным коренным породам. Наименьшие значения ( $V_p$ ) характерны для слоя сезонного промерзания, в основном они лежат в пределах от 300 до 400 м/с. Согласно существующим нормативным документам, грунты соответствующие первому распределению, если их мощность составляет не менее 10 м, относятся к «средним» по сейсмическим свойствам (II-категория) и их сейсмическая опасность будет соответствовать исходной.

Скорости продольных волн в водонасыщенных разновидностях рыхлых грунтов могут увеличиваться в 2–5 раза по сравнению с воздушно-сухими и, соответственно, значения  $V_p$  лежат в интервале от 1500 до 2300 м/с. Обводненные рыхлые грунты в большинстве случаев относятся к III-й категории по сейсмическим свойствам и по отношению к средним их сейсмическая опасность может увеличиться на один балл. В зависимости от степени разрушения скальных пород скорости Р-волн в них изменяются от 700 м/с в рухляках до 2000 м/с – в сильно разрушенных породах и 2000–4000 м/с – в слабо разрушенных породах. На исследуемых плотинах диапазон изменения скоростей от разрушенных до слабо трещиноватых скальных пород меняются в пределах 1200–3600 м/с. По распределению можно выделить два максимума  $V_p$  равных 2400 и 3000 м/с. По сейсмическим свойствам это грунты I категории и их сейсмическая

опасность обычно принимается на один балл меньше исходной. В нашем случае, отмеченные величины скоростей принимаются в качестве эталонных для всех сооружений данного типа.

Таким образом, для проведения расчетов сейсмической опасности и реализации расчетных методов на участках земляных плотин, проанализированы все необходимые данные о составе грунтов, скоростях распространения в них сейсмических волн, глубине залегания уровня грунтовых вод, мощности рыхлых отложений.

При построении карт сейсмического риска [1; 2; 6] или при его оценке для отдельного сооружения указывается вероятность того, что в данном месте в течение определенного промежутка времени (как правило 50 или 100 лет) произойдет землетрясение, интенсивность которого превысит указанную (расчетную) величину. Характеристикой интенсивности в практике сейсмостойкого строительства является ускорение грунта, и оно выражается в значениях так называемого эффективного пикового ускорения. Это расчетное максимальное ускорение оценивается для определенных участков плотин, представленных сейсмическими моделями. Поскольку эта величина рассчитывается для определенной вероятности, тем самым учитывается неопределенность, с которой ожидается разрушительное землетрясение для изучаемой территории.

На данном этапе проведен необходимый расчет основных характеристик определяющих сейсмическую интенсивность: акселерограмм, спектральных характеристик и спектров ускорений, то есть тех параметров воздействий, которые непосредственно используются при проектировании сейсмостойких сооружений, рассчитываемых на воздействия сильных землетрясений, отвечающих уровню исходной сейсмичности района.

Для расчетов использовался набор необходимых методов и программ при реализации построения расчетных моделей и исходного сигнала. Исходный сигнал для вероятного сильного землетрясения определяется на основе количе-

ственных геолого-геофизических и сейсмологических данных. Расчетная модель – на основе прямых измерений скоростей сейсмических волн на земляных плотинах.

Для построения моделей использовались участки типовых моделей и результаты сейсморазведочных измерений, выполненные на этих участках. Учитывались и обобщенные данные о скоростях сейсмических волн для наиболее распространенных типов грунтов на территории плотин с учетом их состава и состояния.

В результате построено 10 моделей для рассматриваемых объектов. Расчеты для обобщенных сейсмических моделей и типовых разрезов относительно «эталонных» коренных пород приводят к приращениям балльности от 0 до 2 баллов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры расчетных сейсмических моделей  
для обобщенных типовых разрезов

| № модели,<br>типовой разрез                         | h(м)                    | V <sub>p</sub> (м/с)        | V <sub>s</sub> (м/с)    | ρ(т/м <sup>3</sup> )  | ΔI(I)(баллы) |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|
| №1, скальные грунты<br>(эталон)                     | 10                      | 2400<br>3000                | 1300<br>1600            | 2,5<br>2,6            | 0            |
| Неводонасыщенные рыхлые грунты                      |                         |                             |                         |                       |              |
| №2 Дресвяные отложения<br>с супесчаным заполнителем | от 5<br>до 40           | 500<br>2700                 | 250<br>1600             | 1,8<br>2,6            | +0,96        |
| №3 Суглинки, пески                                  | от 5<br>до 40           | 600<br>2800                 | 300<br>1600             | 1,9<br>2,6            | +1,26        |
| №4 Суглинки,<br>дресвяные отложения                 | от 5<br>до 40           | 600–700<br>3000             | 250<br>1600             | 1,8<br>2,6            | +1,11        |
| №5 Пески, суглинки, щебень,<br>глыбы                | до 10<br>до 40          | 700–800<br>3000             | 350–400<br>1500         | 1,9–2,0<br>2,5–2,6    | +1,1         |
| №6 Крупнообломочные отложения,<br>пески, суглинки.  | до 10<br>до 20<br>до 40 | 700<br>800–900<br>2400–3000 | 350<br>400<br>1300–1600 | 1,8<br>1,9<br>2,5–2,6 | +1,1         |
| №7, средние грунты<br>(эталон)                      | до 10<br>до 40          | 720<br>2400–3000            | 360<br>1300–1600        | 1,9<br>2,5–2,6        | +1,0         |
| Водонасыщенные рыхлые грунты                        |                         |                             |                         |                       |              |
| №8 Рыхлые, УГВ с 5м                                 | 5<br>10                 | 1600<br>2400–3000           | 380<br>1300–1600        | 2,0<br>2,5–2,6        | +1,36        |

|                                              |       |           |           |         |       |
|----------------------------------------------|-------|-----------|-----------|---------|-------|
| №9 Рыхлые, УГВ с 3м                          | 3     | 720       | 360       | 1,8     | +1,69 |
|                                              | 7     | 1600      | 380       | 2,0     |       |
|                                              | 10    | 2400–3000 | 1300–1600 | 2,5–2,6 |       |
| №10 «Средние грунты» по составу, обводненные | до 10 | 1700      | 420       | 2,0     | +2,00 |
|                                              | до 40 | 2400–3000 | 1300–1600 | 2,5–2,6 |       |

Модели №1 и №7 соответствуют эталонным скальным и средним грунтам, они практически обоснованы, при анализе сейсмических свойств средних и коренных пород.

Модели №2–6 соответствуют различной мощности неводонасыщенных рыхлых грунтов, которая увеличивается от 5 до 40 м. Подстилаются они коренными породами с «эталонными» значениями скоростей. Для участков с различной глубиной залегания грунтовых вод составлено три модели №8–10. Глубина залегания УГВ составляет 0; 3 и 5 м – соответственно. Модель №10 полностью соответствует модели 7 по составу и мощности рыхлых грунтов.

Расчеты параметров сейсмических воздействий в максимальных или эффективных ускорениях для площадок, соответствующих построенным моделям получены следующим путем.

Учитывая параметры сильных землетрясений и диапазоны их изменений для рассматриваемых объектов, нами была синтезирована исходная акселерограмма для горизонтальной (EW) компоненты. Акселерограмма приведена к скальному основанию, ее основные параметры следующие: максимальное ускорение  $58 \text{ см/с}^2$ , максимальное значение спектра  $10 \text{ см/с}$ , интервал частот спектра на уровне 0,7 от максимума меняется от 1 до 5 Гц, длительность колебаний на уровне 0,3 от максимума составляет 20 с.

Максимальные значения ускорений коренных пород для горизонтальной компоненты не превышает  $110 \text{ см/с}^2$ . Это согласно шкале балльности соответствует эталонному сейсмическому воздействию для скальных пород района равному 7 баллам. Спектр ускорений имеет максимум (на уровне 0,5) в интервале частот 1–5,5 Гц. Основные максимумы приходятся на частоты 1,5 и 2,5 Гц и спектральные плотности на них достигают значений 22; 23  $\text{см/с}$  – для компоненты EW.

Для модели эталона, представленной средними грунтами максимальное ускорение может достигать  $210 \text{ см/с}^2$ , что соответствует 8-ми балльному воздействию соответствующему исходной сейсмичности районов расположения плотин. Для дальнейших расчетов нами использовалась исходная акселерограмма синтезированная для скальных грунтов, как менее искаженная приповерхностными неоднородностями. Поэтому, для реализации расчетов, сейсмические модели построены до монолитных коренных пород, принятых нами за эталон.

Расчетные параметры эталонных сейсмических воздействий являются в какой-то степени масштабированными на 7-ми балльные сейсмические воздействия скального основания и 8-ми балльные для средних грунтов. Однако, они получены путем анализа реальных землетрясений, соответствующих параметрам основных зон ВОЗ для участков объектов, и будут отвечать вероятным сильным землетрясениям по максимальным ускорениям и частотному составу. Кроме того, масштабирование позволяет расчетным путем оценивать более реально изменение частотного и амплитудного состава эталонных сейсмических колебаний верхними грунтовыми слоями ложа плотин.

Для моделей 2–6 (воздушно-сухие грунты) результаты расчетов при мощности рыхлых отложений от 5–10 до 50 м ускорение колебаний меняется от 200 до  $240 \text{ см/с}^2$ , при максимальной мощности они даже несколько снижаются. Максимумы спектров с возрастанием мощности ведут себя более динамично и соответственно увеличиваются от 36 до 63 см/с. Происходит и некоторое перераспределение их максимумов, они с увеличением мощности рыхлых отложений несколько смещаются в сторону низких частот.

Расчет сейсмических воздействий для частично или полностью водонасыщенных рыхлых грунтов проведен для трех моделей №8, 9 и 10. на случай поднятия УГВ на 5, 3 и 0 м от поверхности – соответственно. Расчеты проведены в предположении, что вся энергия колебаний уходит на упругие деформации. При расчетах использовался подход, учитывающий увеличение интенсивности

колебаний слоя водонасыщенных грунтов по отношению к неводонасыщенным, через расчет относительных экспериментальных частотных. При таком подходе величина ускорений для построенных моделей составляет 270, 330 и 420 см/с<sup>2</sup> – соответственно, а максимальное значение спектра меняется от 51 до 79 см/с. Основные максимумы спектров ускорений лежат на частотах от 1 до 5 Гц.

Выполненный объем исследований позволил нам подготовить методику геофизических исследований для районирования техногенной опасности земляных плотин при возможных сейсмических событиях, что может повлиять на технологический процесс существующих и проектируемых промышленных предприятий и экологическую ситуацию близлежащих территорий.

### *Список литературы*

1. Джурик В.И. Динамика физического состояния ослабленных зон насыпной плотины Иркутской ГЭС за период 2002–2012 гг. / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2014. – Т. 8. – С. 35–41.

2. Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н. Районирование проявления прогнозной сейсмичности в пределах Танлу-Курского линейного элемента (Дальний Восток) / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак, А.Ю. Ескин // Тихоокеанская геология. – 2016. – Т. 35. – №5. – С. 116–129.

3. Кузнецов В.С. Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2000. – Вып. 238. – С. 20–24.

4. Олигви А.А. Основы инженерной геофизики / А.А. Олигви. – М.: Недра, 1990. – 501 с.

5. Распопин Г.А. Фильтрация через грунтовые плотины с ядром / Г.А. Распопин, С.И. Лещенко // Известия вузов. Строительство. – 2006. – Вып. 8. – С. 47–51.

6. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии / Отв. ред. Ф.И. Иванов. – Иркутск, ИЗК СО РАН, 2009. – 420 с.



**Серебренников Сергей Петрович** – канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Россия, Иркутск.

**Serebrennikov Sergei Petrovich** – candidate of geologo-mineralogical sciences, senior research officer of FSFIS “Earth crust Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Irkutsk.

**Джурик Василий Ионович** – д-р геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Россия, Иркутск.

**Dzhurik Vasiliy Ionovich** – doctor of geologo-mineralogical sciences, head of laboratory of FSFIS “Earth crust Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Irkutsk.

**Ескин Александр Юрьевич** – канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Россия, Иркутск.

**Eskin Aleksandr Yuryevich** – candidate of geologo-mineralogical sciences, research officer of FSFIS “Earth crust Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Irkutsk.

**Брыжак Евгений Вадимович** – канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Россия, Иркутск.

**Bryzhak Evgeniy Vadimovich** – candidate of geologo-mineralogical sciences, research officer of FSFIS “Earth crust Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Irkutsk.

---