

Детальные геолого-структурные исследования для уточнения уровня сейсмической опасности гидротехнических сооружений (на примере Днепровской ГЭС)

© Ю. М. Вольфман¹, А. М. Скляр¹, В. Г. Верховцев²,
В. А. Королев¹, Е. Я. Колесникова¹, А. М. Останин¹, 2011

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Институт геохимии окружающей среды НАН и МЧС Украины,
Киев, Украина

Поступила 6 мая 2011 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

На основі результатів комплексних дистанційних, польових геолого-структурних та інструментальних сейсмологічних досліджень виявлено і параметризовано зони основних тектонічних порушень, здатних вплинути на безпеку функціонування основних споруд Дніпровської ГЕС. Проведено ідентифікацію деформаційних режимів і реконструкцію полів напружень, що зумовили особливості тектонічного розривоутворення в регіоні. Оцінено розрахункові значення сейсмічних впливів з урахуванням локальних інженерно-геологічних і тектонічних умов території розміщення греблі Дніпровської ГЕС.

According to the results of complex remote geologic-structural and instrumental seismic field studies zones of the main tectonic faults, which are capable to have an influence on security of functioning of the main constructions of the Dniprovsk HES have been revealed and parameterized. Identification of deformational regimes and reconstruction of stress fields, which caused the special features of tectonic ruptures formation in the region have been made. Calculated values of seismic effects have been estimated taking into account local engineering-geological and tectonic conditions of the dam location area of the Dniprovsk HES.

Введение. Крупные гидротехнические сооружения относятся к категории особо ответственных объектов, разрушение которых может повлечь тяжелые социально-экономические и экологические последствия. К числу факторов, представляющих потенциальную угрозу для сооружений каскада Днепровских ГЭС (возведенных, в соответствии с нормативной базой своего времени, без применения антисейсмических мероприятий), относятся сейсмические воздействия тектонической и техногенно-индуцированной природы, а также тектонические нарушения, пересекающие территорию расположения объектов и проявляющие активность на современном этапе. В

настоящее время эта угроза обретает весьма реальные очертания, поскольку оказалось, что считавшиеся ранее асейсмичными районы Украинского щита (УЩ) на самом деле не являются таковыми. Пример тому — ощутимые землетрясения с магнитудой M до 4,0 и с интенсивностью сейсмических сотрясений в эпицентре I_0 до 6 баллов по шкале MSK-64, произошедшие в пределах УЩ и смежных с ним территорий в последнее десятилетие [Пронишин и др., 2004; Свидлова, 2006; Габсатарова, Бабкова, 2006; 2008; Пустовитенко и др., 2008; Андрущенко и др., 2010 и др.]. При этом землетрясения возникают не только на периферии УЩ, но и в центральной

его части [Скляр и др., 2009; Пустовитенко и др., 2010], в непосредственной близости от территории размещения плотины Днепровской ГЭС. 14.01.2011 г. в районе г. Кривой Рог на расстоянии около 150 км от промплощадки ДнепроГЭС произошло очередное ощутимое землетрясение. По данным Крымской сети сейсмических станций его энергетический класс составил $K=9,8$, интенсивность сотрясений в эпицентре $I_0=3 \div 4$ балла.

В связи с этим актуален вопрос о геодинамических условиях и сейсмической опасности одного из самых старых сооружений каскада — плотины Днепровской ГЭС (г. Запорожье), находящейся в сложных структурно-геологических условиях.

Задачи и методы исследований. Цель проводимых исследований — изучение влияния геолого-структурных условий района размещения Днепровской ГЭС на безопасность ее эксплуатации.

Особенностью крупномасштабного изучения действующих объектов гидроэнергетики является невозможность непосредственного исследования их основания и прилегающих участков верхнего и нижнего бьефа, находящихся, как правило, в зоне затопления. Этим обстоятельством предопределен выбор комплекса методов, а также необходимость существенного расширения границ обследуемого участка и экстраполяции в его пределы результатов изучения наиболее близко расположенных разрывных структур или их системных аналогов.

Исследования включали:

- анализ результатов геологических и инженерно-геологических изысканий, проводимых в разные периоды строительства и эксплуатации Днепровской ГЭС;

- дистанционные исследования с применением морфографического метода дирекционных направлений и аномалий, морфометрического метода поиска геоструктур, дешифрирования и структурно-геологической интерпретации материалов аэрокосмосъемок;

- геолого-структурное и тектонофизическое изучение тектонической трещиноватости и зон тектонических разломов с целью выявления и параметризации тектонических разрывов, а также для выбора пунктов инструментальных сейсмологических наблюдений;

- тектонофизическую интерпретацию материалов: идентификацию деформационных режимов и реконструкцию полей напряжений тектонического разрывообразования;

- инструментальные сейсмологические исследования методами регистрации высокочастотных микросейсм и записи поверхностного взрыва небольшой мощности для оценки влияния выявленных тектонических нарушений на интенсивность сейсмических воздействий.

Геологическое строение и сейсмическая опасность района размещения Днепровской ГЭС. В тектоническом отношении Днепровский гидроузел расположен в центральной части Запорожского блока, входящего в состав Среднеприднепровского гранитогнейсового мегаблока УЩ — консолидированного массива с дорифейским возрастом складчатости [Тектонічна ..., 2004]. Основными тектоническими нарушениями региона являются Криворожско-Кременчугская и Орехово-Павлоградская зоны глубинных разломов субмеридионального простирания, разграничивающих мегаблоки УЩ. Кратчайшее расстояние от них до г. Запорожье составляет не менее 130 и 55 км соответственно. На северо-западе структурным ограничением Запорожского блока служит Дерезоватская, на юго-востоке — Малоекатериновская межблоковые зоны разломов северо-восточной ориентировки, между которыми (приблизительно на равном удалении от них) располагаются сооружения Днепровской ГЭС. К северу и югу от г. Запорожье находятся Девладовский и Конковский разломы субширотного простирания (рис. 1). Время заложения основных зон разломов — от архея до позднего протерозоя; впоследствии некоторые из них неоднократно подвергались активизации, в том числе новейшей [Карта ..., 1987].

По данным изысканий института "Укргідропроект" основанием плотины Днепровской ГЭС служат образования днепровского ультраметаморфического комплекса архея, выходящие на земную поверхность или перекрытые маломощным осадочным чехлом: плагиоклазовые граниты, включающие жилы метасоматических гранитов, пегматитов, кварца, дайки габбро-диабазов; встречаются гнейсы и гранитогнейсы. Породы разбиты на блоки в форме параллелепипедов, которые ограничены системами трещин с элементами залегания: а) $40-60^\circ/60-80^\circ$ ¹; б) $310-330^\circ/70-90^\circ$; в) субгоризонтальные с углами падения до 30° . Преобладающее расстояние между

¹ В числителе — азимут падения, в знаменателе — угол падения трещин.

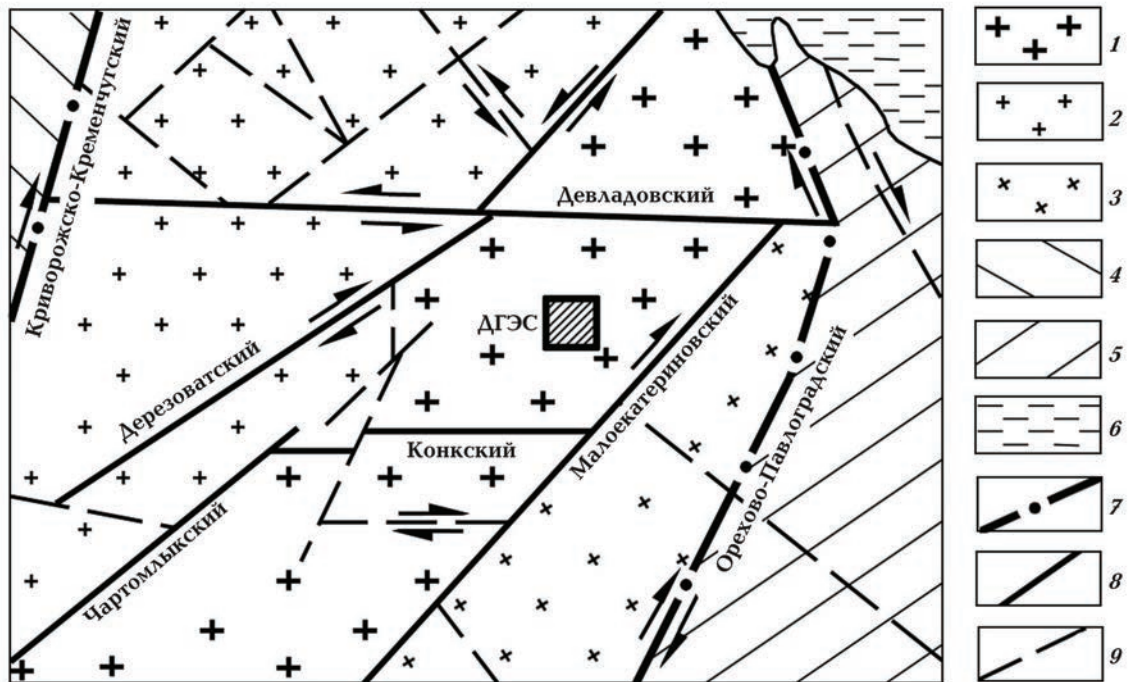


Рис. 1. Тектоническая схема района размещения Днепровской ГЭС: 1—3 — блоки Среднеприднепровского гранитогнейсового мегаблока УЩ (1 — Запорожский, 2 — Днепропетровский, 3 — Васильевский); 4, 5 — мегаблоки УЩ, смежные со Среднеприднепровским мегаблоком (4 — Кировоградский, 5 — Приазовский); 6 — краевая зона Днепровско-Донецкой впадины; 7—9 — зоны тектонических нарушений УЩ (7 — разделяющие мегаблоки, 8 — межблоковые, 9 — внутриблоковые (стрелки — перемещения блоков земной коры в архее—протерозое)); ДГЭС — местоположение участка работ.

трещинами составляет 1,0—1,5 м, максимальное — 5 м. Основание плотины возведено непосредственно на образованиях кристаллического фундамента, так как в процессе строительства была произведена выемка рыхлых и илистых грунтов с заглублением в скальные породы [Левицкий, Шпак, 1990].

О разрывных тектонических нарушениях в основании плотины было известно с момента ее возведения. Основной шов разлома был прослежен в 180 м от западного края плотины в виде трех сближенных зон дробления северо-восточного простирания ($310/70-85^\circ$) мощностью от 2—3 до 6 м каждая. Зоны сложены интенсивно трещиноватыми, сильно выветрелыми гранитами и хлоритовыми сланцами, представляющими собой глинку трения. Отмечены сильное выщелачивание, кавернозность, по трещинам — хлоритизация. Керн при бурении выходил щебнем, дресвой и песком разной зернистости. Аналогичная, но менее выраженная зона тектонического нарушения, была зафиксирована вблизи восточного края плотины. К обеим зонам приурочен

переуглубления дна реки, подтоки глубинных вод повышенной минерализации и выходы газа [Левицкий, Шпак, 1990].

В сейсмическом отношении основную опасность для Днепровской ГЭС представляют: разрушительные подкоровые землетрясения очаговой зоны Вранча, коровые землетрясения Крымско-Черноморской сейсмоактивной области, "местные" землетрясения, происходящие в пределах УЩ, и техногенные землетрясения, связанные с заполнением водохранилища и работой ГЭС.

Наиболее опасными являются землетрясения очаговой зоны Вранча. Согласно расчетам [Друмя, Степаненко, 1972; Ризниченко и др., 1976], один раз в 100 лет (вероятность $P = 0,01$) здесь возможны землетрясения с магнитудой $M_{\max} = 7,3 \pm 0,1$; раз в 1000 лет ($P = 0,001$) — с $M_{\max} = 7,6 \pm 0,1$. Только за последние 70 лет интенсивность четырех из них (1940, 1977, 1986 и 1990 гг.) в районе Днепровской ГЭС достигала 4—5 баллов по шкале MSK-64 [Бунэ и др., 1986; Кармазин и др., 1979; Кондорская и др., 1989; Князева и др., 1994].

Менее интенсивные воздействия на исследуемую территорию оказывают землетрясения Крымско-Черноморского региона. Последнее сильное из них (11.09.1927 г., $M_w = 6,9$) [Пустовитенко, 2007], вызвавшее значительные разрушения на Южном берегу Крыма, ощущалось в г. Запорожье с интенсивностью 3—4 балла. При этом сильные землетрясения в Крымском регионе происходят гораздо реже, чем в Карпатском: за последние 2000 лет известно около десяти "крымских" землетрясений с $M \geq 6,0$ и интенсивностью в эпицентре $I_0 \geq 8$ баллов [Полный ..., 1975; Новый ..., 1977].

Сейсмическая опасность, обусловленная "местными" землетрясениями, является наименее изученной, так как сейсмическая активность региона относительно невысокая, а ощутимые землетрясения происходят здесь сравнительно редко. Магнитуды известных землетрясений в пределах УЩ достигали значений $M = 3,5 \div 4,0$; их очаги располагались на небольших глубинах (5—15 км), а интенсивность сотрясений быстро угасала с увеличением эпицентрального расстояния. По данным ранее проведенных исследований, потенциально сейсмоопасными для исследуемого района являются зоны Чартомлыкского, Девладовского, Орехово-Павлоградского и Конкского разломов, расположенных на расстоянии от 35 до 130 км от Днепровской ГЭС. При возникновении в их пределах землетрясений с прогнозируемой магнитудой $M = 4,0$ и глубиной очага $H = 10$ км интенсивность сотрясений в рассматриваемом районе не превысит 5 баллов.

Магнитуда техногенных землетрясений, связанных с заполнением водохранилища и работой ГЭС, по прогнозным оценкам не превысит максимальной магнитуды "местного" тектонического землетрясения ($M \leq 4$).

Прогнозные оценки сейсмических воздействий на территорию размещения плотины Днепровской ГЭС приведены в табл. 1 [Определение ..., 1997].

Согласно требованиям действующих нормативных документов [Будівництво ..., 2006], при расчете сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений значение нормативной балльности, отнесенное к грунтам II категории по сейсмическим свойствам, для периода повторяемости $T = 500$ лет (сейсмический риск $P = 10\%$) принимается в качестве проектного землетрясения (ПЗ), для периода повторяемости $T = 5000$ лет ($P = 1\%$) — в качестве максимального расчетного землетрясения (МРЗ). Поскольку основанием плотины Днепровской ГЭС служат скальные породы (граниты, гранитогнейсы), относящиеся к I категории, прогнозные значения ПЗ и МРЗ должны быть уменьшены на 1 балл [Рекомендации ..., 1985].

Таким образом, расчетные значения сейсмических воздействий для плотины Днепровской ГЭС с учетом локальных инженерно-геологических условий составляют: для ПЗ ($T = 500$ лет, $P = 10\%$) $I_0 = 3,9$ балла по шкале MSK-64; для МРЗ ($T = 5000$ лет, $P = 1\%$) $I_0 = 5,0$ баллов.

Результаты геолого-структурных исследований: выявление и параметризация основных зон тектонических нарушений в

Т а б л и ц а 1. Прогнозные оценки сейсмических воздействий на территорию Днепровской ГЭС для разных периодов повторяемости

Период повторяемости T , год	Расчетная интенсивность I_0 , балл, для грунтов по сейсмическим свойствам		Вероятность превышения максимальной интенсивности в течение 50 лет P , %	Примечание
	II категория	I категория		
100	4,1	3,1	39,5	—
500	4,9	3,9	10	ПЗ
1000	5,2	4,2	5	—
5000	6,0	5,0	1	МРЗ
10 000	6,0	5,0	1	—

пределах района размещения Днепровской ГЭС. Полевым исследованиям предшествовали морфографические и морфометрические построения и дешифрирование аэрокосмоснимков. По итогам анализа полученных материалов была составлена схема линеаментных зон (предположительно активных на новейшем этапе развития линейных структур) масштаба 1 : 10 000 [Верховцев, 2010], согласно которой в пределах изучаемой территории доминируют ортогональная (азимуты простирания 0 и 90°) и диагональная (40—45°, 310—315°) системы линеаментов (рис. 2). К разряду "угнетенных" отнесена линеаментная зона восточно-северо-восточного простирания (№ 11), названная нами Староднепровской, поскольку она обусловила положение русла р. Старый Днепр и линейные очертания его скалистых берегов.

В процессе полевых геолого-структурных и тектонофизических работ были обследованы разломно-трещинные зоны в гранитном карьере, расположенном на правом берегу

р. Старый Днепр на удалении около 3,5 км от плотины (пункты тектонофизических наблюдений (птн) № 1 и № 6). Разломно-трещинные зоны представляют собой сравнительно легко визуализируемые участки повышенной концентрации прямолинейных субпараллельных сближенных трещин в слабоструктурированном массиве или на фоне относительно бессистемной трещиноватости, которые включают зоны дробления и вторичных изменений пород, продукты гидротермальной деятельности, зеркала скольжения на стенках отдельных разрывов. Также обследованы скальные выходы гранитов на о-ве Хортица, формирующие обрывы его северной оконечности (птн № 2), в Черном урочище (птн № 3), на северо-восточном берегу (птн № 4) и на территории Днепровской ГЭС в непосредственной близости от машинного зала ДнепроГЭС-1 (птн № 5).

В общих чертах структурные особенности территории размещения Днепровской ГЭС и ее окрестностей характеризует сводная сте-

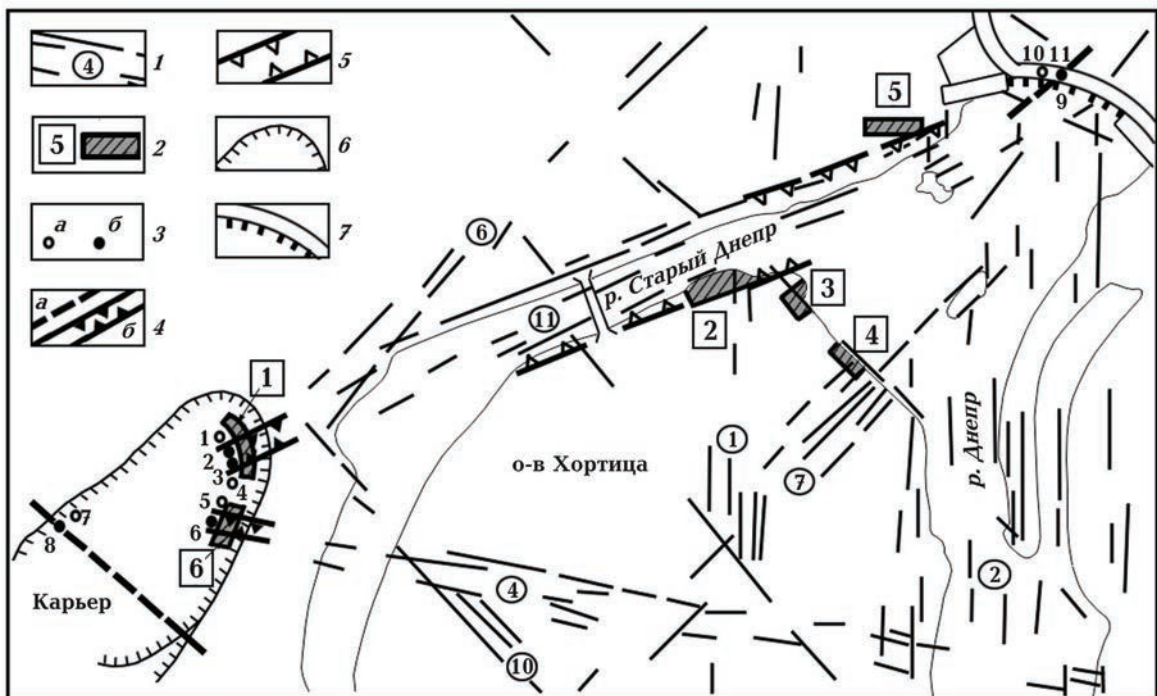


Рис. 2. Схема активных на новейшем этапе развития линейных структур и размещения пунктов тектонофизических и сейсмологических наблюдений в районе Днепровской ГЭС: 1 — зоны линеаментов и их номера; 2 — пункты тектонофизических наблюдений (птн) и их номера; 3 — пункты инструментальных сейсмологических наблюдений (псн) и их номера (а — в относительно ненарушенных породах (эталонные), б — в пределах зон тектонических нарушений); 4 — изученные разломно-трещинные зоны (а — внемасштабные, б — в масштабе схемы); 5 — границы Староднепровской разломной зоны; 6 — гранитный карьер; 7 — плотина Днепровской ГЭС.

реограмма полюсов тектонических трещин (рис. 3), показывающая высокую избирательность направлений разрывообразования: контрастные аномалии (более 60 % полюсов разрывов) отражают доминирующее развитие структур северо-восточной (38 %) и субширотной (22 %) ориентировок. В первом случае аномалия характеризует совокупность полигенетических (с точки зрения кинематических обстановок их формирования) тектонических трещин в относительно широком диапазоне азимутов простираний ($20\text{--}60^\circ$, максимум — около $35\text{--}40^\circ$). Субширотные структуры сконцентрированы в относительно узком интервале простираний ($265\text{--}285^\circ$, максимум — около 280°) и, вероятно, относятся к одному структурно-кинематическому парагенезису (СКП).

Преобладание крутопадающих (с углами падения $\geq 70^\circ$), закономерно ориентированных трещин свидетельствует о доминирующей структурообразующей роли сдвиговых деформационных режимов, обусловленных обстановками субгоризонтального сжатия—растяжения. В этих условиях формируются сдвиговые или с преобладающей сдвиговой составляющей тектонические нарушения — сдвиги, сбросо- и взбросо-сдвиги. Ориентировки крутопадающих тектонических разрывов по пунктам наблюдений приведены на рис. 4. Они позволяют идентифицировать соответствующие им линеаментные зоны как разломно-трещинные зоны и реконструировать обстановки их формирования (активизации).

В условиях субгоризонтального сжатия—растяжения происходила и последующая активизация разрывных структур: вторичные смещения крыльев разрывов, фиксируемые по зеркалам скольжения на стенках трещин, имеют исключительно сдвиговый, редко — сбросо-сдвиговый характер (рис. 5). Таким образом, можно констатировать, что основными дизъюнктивными структурными элементами в пределах изучаемой территории являются сдвиговые разрывы северо-восточного и субширотного простираний.

По ориентировке максимумов трещиноватости в птн № 1, 2 и 5 (рис. 4, диаграммы 1, 2, 5), расположенных в пределах Староднепровской линеаментной зоны № 11, последняя уверенно идентифицируется как разломно-трещинная зона, за которой логично сохранить название Староднепровской. В карьере (птн № 1) она выражена системой сближенных субвертикальных, относительно прямолиней-

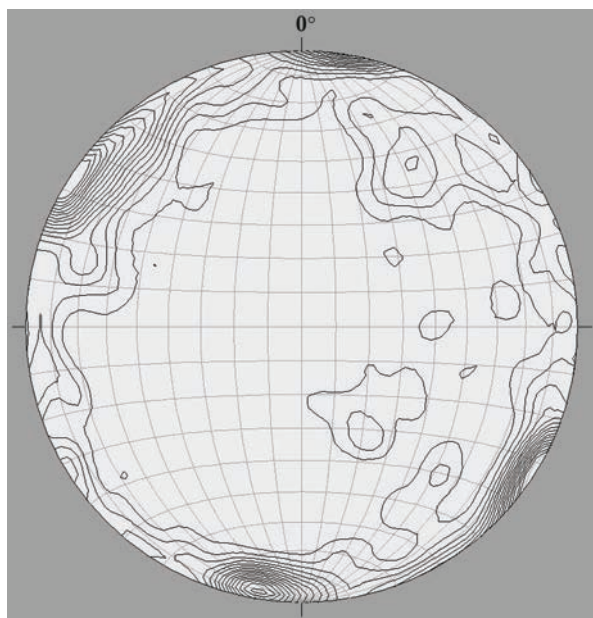


Рис. 3. Сводная стереограмма (верхняя полусфера) тектонической трещиноватости района исследований (651 замер). Изолинии плотности полюсов трещин: 0,5; 1,0; 1,5 ... %.

ных протяженных трещин в интервале шириной $30\text{--}35$ м. Некоторые из них служат ограничением субпараллельных обводненных зон дробления мощностью до $1\text{--}1,5$ м с широким развитием вторичных изменений (окварцевание, обохренность, хлоритизация и др.) и жилами кварца. На стенках некоторых трещин зафиксированы зеркала скольжения — преимущественно правые сдвиги субширотного, восточно-северо-восточного и северо-восточного простираний и левые сдвиги и сбросо-сдвиги западно-северо-западной ориентировки — $290\div 300^\circ$ (рис. 5, а, б).

Анализ простираний трещинных структур в птн № 1 показал, что суперпозиция данного пункта характеризуется пересечением тектонических нарушений двух или трех систем (рис. 4, диаграмма 1). Наибольшее развитие имеют трещины северо-восточного ($35\text{--}50^\circ$ с максимумами 40 и 50°) и восточно-северо-восточного простираний ($60\text{--}75^\circ$), составляющие ~ 35 и 23% от общего количества. Эти направления соответствуют ориентировкам линеаментных зон № 6 и 11 с азимутами простираний ~ 35 и 60° , узел пересечения которых приходится на данный пункт наблюдений. При этом следует отметить, что не все трещины северо-восточного простирания ($35\text{--}50^\circ$) сингенетичны структуре линеаментной

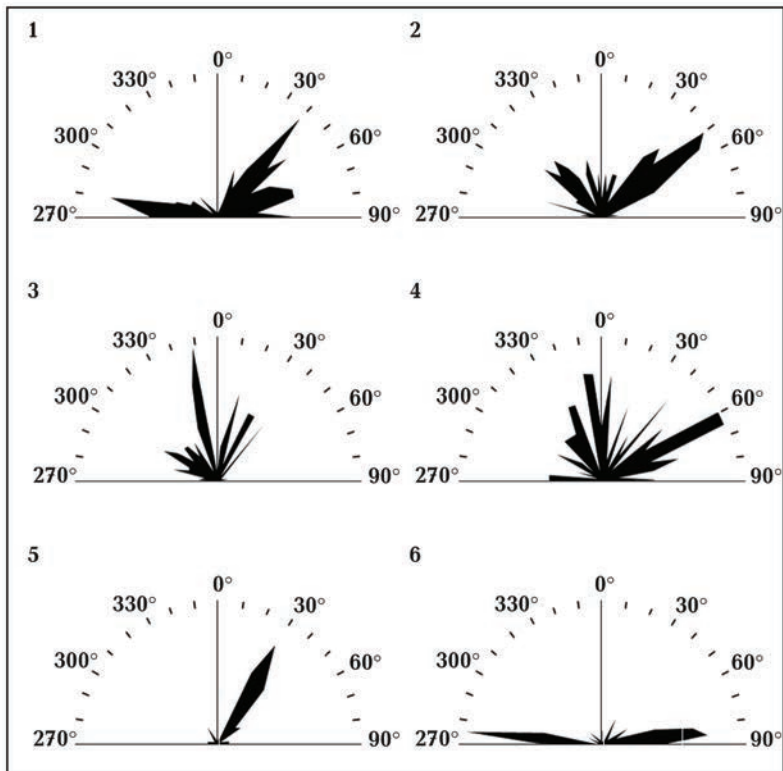


Рис. 4. Розы-диаграммы ориентировок тектонических трещин с углами падения $\geq 70^\circ$ (номера диаграмм соответствуют номерам пунктов тектонофизических наблюдений на рис. 2).

зоны № 6. Как показывает анализ трещиноватости в других пунктах, расположенных в пределах Староднепровской зоны, тектонические разрывы этой системы являются одним из элементов СКП именно этой зоны.

Староднепровская разломно-трещинная зона отчетливо проявляется по преобладающим ориентировкам тектонической трещиноватости на левом берегу р. Старый Днепр, формируя очертания береговых обрывов о-ва Хортица на участке между автомобильным мостом и северной оконечностью острова (рис. 2, птн № 2). Концентрированные максимумы простираний трещин в этом пункте согласуются с максимумами в птн № 1: наиболее выражено общее восточно-северо-восточное направление Староднепровской зоны (28% замеренных трещин имеют простирание $50\text{—}65^\circ$, максимум на $50\text{—}55^\circ$); структуры диагональной северо-восточной ориентировки ($30\text{—}40^\circ$) составляют 16% (см. рис. 4, диаграмма 2). Менее интенсивно проявлены трещинные структуры северо-западного и субмеридионального простираний; тектонические разрывы субширотного или близкого к нему направ-

лений практически отсутствуют. По-видимому, тектоническая трещиноватость в птн № 2 характеризует южный фланг Староднепровской зоны, поскольку в птн № 3 ("Черное урочище") и птн № 4, расположенных на северо-восточном берегу о-ва Хортица в непосредственной близости от птн № 2, характер ориентировок трещин совершенно иной. Здесь доминируют субмеридиональные и близкие к ним по простиранию тектонические разрывы (см. рис. 4, диаграммы 3, 4). Структуры восточно-северо-восточной ориентировки, проявившиеся в птн № 4, соответствуют иной линейной зоне № 7 (максимумы на 40° и $60\text{—}65^\circ$). Таким образом, восточно-юго-восточная граница Староднепровской зоны находится на о-ве Хортица между птн № 2 и 3, а в гранитном карьере — между птн № 1 и 6. В качестве северного краевого фрагмента Староднепровской зоны можно рассматривать проявление интенсивной тектонической трещиноватости в коренных обнажениях гранитов в непосредственной близости от машинного зала ДнепроГЭС-1 (см. рис. 2, птн № 5). Ориентировки трещин в этом пункте концен-

трируются в узком диапазоне ($25\text{--}40^\circ$) с максимумом $\sim 30^\circ$ (см. рис. 4, диаграмма 5).

Следовательно, можно полагать, что тектонические нарушения, зафиксированные в основании платформы при ее возведении, являются составным элементом (одним из проявлений) Староднепровской разломно-трещинной зоны. Об этом свидетельствуют:

- пространственная приуроченность этих нарушений к осевой части Староднепровской

разломно-трещинной зоны;

- северо-восточное их простирание, согласующееся с ориентировками максимумов тектонических разрывов Староднепровской зоны в птн № 1, 2 и 5.

Кроме охарактеризованных выше линейментных зон № 11 (Староднепровской), 6 и 7, отчетливое структурное выражение имеет и зона № 4. Она зафиксирована в восточном борту гранитного карьера (см. рис. 2, птн

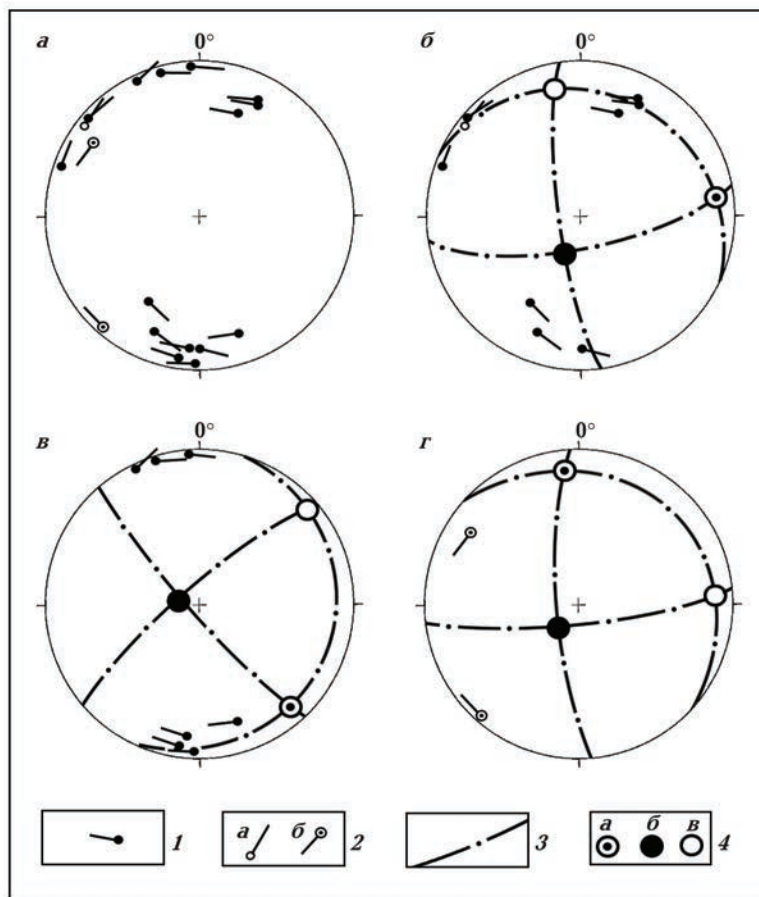


Рис. 5. Обстановки формирования структурно-кинематических парагенезисов вторичных смещений. Стереодиаграммы (верхняя полусфера): *а* — сводная полюсов зеркал скольжения и траекторий подвижек (по замерам в птн № 1, 2, 6); *б—г* — структурно-кинематических парагенезисов (*б* — широтного сжатия (меридионального растяжения) в птн № 1 и 6 ($\sigma_1 = 82/12^\circ$, $\sigma_2 = 201/68^\circ$, $\sigma_3 = 350/17^\circ$; деформационный режим — сдвиговый); *в* — юго-восточного—северо-западного сжатия (северо-восточного—юго-западного растяжения) в птн № 1 ($\sigma_1 = 138/8^\circ$, $\sigma_2 = 287/78^\circ$, $\sigma_3 = 48/6^\circ$; деформационный режим — сдвиговый); *г* — меридионального сжатия (широтного растяжения) в птн № 2 ($\sigma_1 = 354/11^\circ$, $\sigma_2 = 217/74^\circ$, $\sigma_3 = 86/11^\circ$; деформационный режим — сдвиговый)); 1, 2 — полюсы трещин и траектории подвижек, зафиксированных (1 — в птн № 1, 2 — *а* — в птн № 6 (среднее по нескольким замерам в пределах одного большого зеркала), *б* — в птн № 2); 3, 4 — проекции плоскостей (3) и главных осей (4) нормальных (соответственно максимальных, промежуточных и минимальных сжимающих) напряжений (*а* — σ_1 , *б* — σ_2 , *в* — σ_3).

№ 6) в виде разломно-трещинной зоны шириной 10—12 м, представляющей собой систему сближенных параллельных, прямолинейных, преимущественно субвертикальных трещин широтного простирания. Диапазон ориентировок трещин относительно узок — 75° — 100° (280°), при этом четко обособляются два максимума в направлениях 80° — 85° и 275° (см. рис. 4, диаграмма б), составляющих соответственно 36 и 39 % от общего количества замеренных разрывов. Аналогичная система трещин образует обособленный максимум также в птн № 1, где тектонические разрывы субширотной ориентировки (280°) составляют ~25 %. Это позволяет полагать, что зона динамического влияния разломной структуры, соответствующей линеamentной зоне № 4, значительно шире, чем показано на рис. 2.

Таким образом, наиболее выраженным дизъюнктивным элементом исследуемой территории, пересекающим основание плотины Днепровской ГЭС, является Староднепровская разломно-трещинная зона, выделенная по ряду прямых и косвенных признаков: а) по наличию зон дробления северо-восточной ориентировки, вскрытых как в основании плотины, так и в гранитном карьере (птн № 1); б) по максимумам тектонической трещиноватости восточно-северо-восточного и северо-восточного простираний в птн № 1, 2 и 5 и отсутствию признаков этой системы в других пунктах; в) по геоморфологическим критериям — в виде линеamentной зоны № 11, в пределах которой локализованы вышеперечисленные структурные элементы.

Идентификация деформационных режимов и реконструкция полей напряжений тектонического разрывообразования (тектонофизическая интерпретация полевых материалов). Применение тектонофизических методов исследований позволило реконструировать обстановки, в которых формировались основные зоны тектонических нарушений исследуемого района и происходила их активизация (вторичные смещения вдоль уже существующих разрывов с образованием зеркал скольжения), а также идентифицировать наиболее распространенные категории разрывов и смещений как определенные элементы структурно-кинематических парагенезисов (СКП), возникающих в тех или иных условиях.

Преобладание крутопадающих тектонических разрывов (см. рис. 3) и наличие зеркал скольжения преимущественно сдвигового типа

(см. рис. 5) свидетельствуют о доминирующей структурообразующей роли сдвиговых деформационных режимов в пределах изучаемой территории, обусловленных обстановками субгоризонтального сжатия—растяжения.

Отчетливо выраженные максимумы ориентировок тектонической трещиноватости в пределах Староднепровской разломно-трещинной зоны являются следствием неоднократных проявлений процессов разрывообразования. Диагональные структуры северо-восточного (35° — 40°) и восточно-северо-восточного (50° — 60°) простираний, образующие парные максимумы (см. рис. 4), идентифицируются как элементы правосдвигового СКП тектонических разрывов, весьма распространенного как на древних платформах, так и в горно-складчатых областях. Этот парагенезис отражает обстановки горизонтального субширотного сжатия — субмеридионального растяжения. При этом роль *L*-сколов играют тектонические разрывы диагональных направлений (35° — 45°), в то время как под углом 15° — 25° к ним, отклоняясь в сторону оси сжатия (50° — 60°), формируются *R*-сколы, обусловившие общее простирание Староднепровской зоны. В аналогичных условиях происходила и последующая активизация разрывных структур региона. Доказательством этого служат правосдвиговые зеркала скольжения северо-восточной и левосдвиговые (сдвиги и сбросо-сдвиги) западно-северо-западной ориентировки, составляющие соответствующий СКП вторичных смещений в птн № 1, а также крупное зеркало скольжения северо-восточного простирания (правый сдвиг), локализованное в приконтактной части субширотной разломно-трещинной зоны в птн № 6 (рис. 5, а, б).

Аналогичные кинематические условия деформирования комплексов УЩ, по-видимому, имеют место и в настоящее время. Об этом свидетельствует механизм очага Криворожского землетрясения 25.12.2007 г., эпицентр которого располагался к западу от изучаемой территории: ориентировки осей напряжений в очаге (для нижней полусферы) составляют: *P* (ось сжатия) — $279/5^{\circ}$, *N* (промежуточная) — $12/38^{\circ}$, *T* (растяжения) — $181/45^{\circ}$ [Пустовитенко и др., 2010]. Подобное положение тензора напряжений характеризует наличие взбросо-сдвигового деформационного режима, обусловленного условиями широтного горизонтального сжатия с равновероятной возможностью возникновения (активизации) тек-

тонических нарушений северо-восточного (правый взбросо-сдвиг) и северо-западного (левый взбросо-сдвиг) простираний. Избирательность проявления того или иного из этих направлений, равно как и некоторая трансформация тензора напряжений (выражающаяся в незначительном его развороте вокруг оси сжатия), обусловлены локальными факторами — особенностями строения участка, в пределах которого произошло образование сейсмогенного разрыва.

По этой причине правосдвиговые парагенезисы разрывов и смещений северо-восточного простирания, установленные в районе размещения Днепровской ГЭС, и сейсмогенный разрыв в очаге Криворожского землетрясения 25.12.2007 г., который, судя по данным макросейсмических исследований, имеет северо-западную ориентировку [Скляр и др., 2009], можно рассматривать как результат действия однотипного регионального (или мегарегионального) поля напряжений, проявляющегося в разные периоды тектонического развития УЩ.

Преобладание тектонических разрывов северо-восточной ориентировки в пределах изучаемой территории объясняется также тем, что в качестве *L*-сколов они способны образовываться (активизироваться) и как левые сдвиги, но в обстановках субмеридионального сжатия. В этом случае парагенетически связанные с ними левосдвиговые *R*-сколы развиваются в направлении $15\text{—}25^\circ$. Незначительное количество тектонических разрывов такой ориентировки свидетельствует о том, что условия субмеридионального сжатия также имели место в пределах изучаемой территории. Однако при этом возникали (активизировались) структуры преимущественно северо-западного и северо-северо-западного простираний, о чем свидетельствуют соответствующие максимумы в птн № 2—4 (см. рис. 4, диаграммы 2—4). Возможность реверсного изменения систем напряжений в истории геологического развития [Новик, Вольфман, 1997; Гинтов, 2001] подтверждает и реконструкция полей напряжений по единичным зеркалам скольжения в зоне Староднепровского разлома на северо-восточном берегу о-ва Хортица в птн № 2 (см. рис. 5, г).

Ортогональная система сдвиговых нарушений (смещений) представлена преимущественно тектоническими разрывами и зеркалами скольжения субширотной ориентировки. Их формирование (активизация) проис-

ходило в условиях субгоризонтального юго-восточного сжатия — северо-восточного растяжения (см. рис. 5, в). В этих же кинематических условиях, вероятно, образовались и субмеридиональные разрывные структуры, широко распространенные в птн № 2—4 (см. рис. 4, диаграммы 2—4). Следовательно, весь спектр ортогональных разрывов можно рассматривать как единый СКП, характеризующий условия сдвигового деформационного режима при юго-восточной — северо-западной ориентировке сжимающих напряжений.

Таким образом, установлено, что тектонические нарушения северо-восточного и восточно-северо-восточного простираний, в том числе зафиксированные в основании плотины при ее возведении, являются проявлением зоны Староднепровского разлома и принадлежат к СКП сдвиговых структур, сформированных в условиях горизонтального субширотного сжатия. Четкая морфоструктурная выраженность Староднепровской разломно-трещинной зоны, сходство структурообразующих полей напряжений на исследуемом участке и в очаге Криворожского землетрясения 25.12.2007 г. свидетельствуют о возможной активизации этой структуры в новейшее время. Однако пространственные параметры (длина, мощность зоны динамического влияния) Староднепровской разломно-трещинной зоны не позволяют отнести ее к разряду потенциально сейсмогенерирующих структур, поскольку основная разгрузка тектонических напряжений в регионе наиболее вероятна в пределах зон протяженных глубинных (Криворожско-Кременчугском, Орехово-Павлоградском) и межблоковых (Дерезоватском, Малоекатериновском) разломов. В пользу этого свидетельствует и то обстоятельство, что установленный характер перемещений блоков земной коры вдоль этих зон в архее — протерозое (см. рис. 1) вполне удовлетворяет современному полю региональных тектонических напряжений.

Результаты инструментальных сейсмологических исследований. Инструментальные сейсмологические наблюдения проводились с целью изучения влияния тектонических нарушений на изменение интенсивности сейсмических воздействий. В качестве объектов изучения были выбраны уверенно идентифицируемые зоны тектонических нарушений, в том числе способные оказать непосредственное влияние на сооружения Днепровской ГЭС (см. рис. 2):

- разломно-трещинная зона, вскрытая в северо-восточном борту гранитного карьера и являющаяся фрагментом Староднепровской зоны (пункты инструментальных сейсмологических наблюдений псн № 1—4);

- разломно-трещинная зона субширотной ориентировки, соответствующая линеamentной зоне № 4, вскрытая в восточном борту гранитного карьера (псн № 5, 6);

- разломная зона северо-западного простирания, характеризующаяся высокой степенью дробления пород, прослеживаемая через весь карьер (псн № 7, 8);

- тектоническая зона, выявленная в основании плотины на стадии инженерно-геологических изысканий; изучение этой зоны выполнено в псн № 11, 10, расположенных в верхней потере плотины.

Исследования выполнялись методом регистрации высокочастотных микросейсм. Кроме этого, использовались записи поверхностного взрыва небольшой мощности. Регистрация осуществлялась цифровыми сейсмическими станциями SDAS. В качестве сеймоприемников использовались сейсмометры СМЗ-КВ и модифицированные сейсмометры ВЭГИК со встроенными усилителями. Динамический диапазон станции составляет 120 дБ, частота квантования входного сигнала — 100 отсчетов в секунду. Амплитудно-частотная характеристика станции рассчитана генераторным способом по специальной программе; ее "столообразная" часть охватывает интервал от 0,7 до 10 Гц. Экспериментальная проверка идентичности сейсмометрических каналов и определение соотношения между единицами АЦП цифровой станции и "истинными" движениями земной поверхности выполнены на специальной платформе. Погрешность взаимной идентификации каналов не превышала 12 %.

При выполнении работ на участках каждой из изучаемых зон пункты наблюдений устанавливались внутри зоны (сравниваемый пункт) и вне зоны (эталонный пункт). Регистрация осуществлялась в трех взаимно перпендикулярных направлениях: север—юг (NS), запад—восток (WE) и вертикальном (Z). Продолжительность регистрации зависела от характера вариаций спектрально-временных характеристик микросейсмического поля в районе работ. Отсутствие ближних техногенных источников микросейсм в гранитном карьере позволило получить надежные оценки приращений сейсмической интенсивности в зонах изучаемых тектонических нарушений по

2—4-часовым записям микросейсм. В потере плотины Днепровской ГЭС в связи с наличием многочисленных, различных по интенсивности, характеру и времени возникновения техногенных помех (в первую очередь, транспортных) продолжительность регистрации, осуществлявшейся в ночное время, составила 12 часов.

Приращения сейсмической интенсивности (ΔI) оценивались по отношению спектральных плотностей записей различных составляющих колебаний земной поверхности на исследуемых и эталонных пунктах по методике, разработанной в Институте геофизики НАН Украины [Кендзера и др., 1989], в соответствии с формулами [Рекомендации ..., 1985]:

$$\Delta I = 2,0 \lg (S_{\text{и}}(\omega) / S_{\text{эт}}(\omega))$$

— по методу микросейсм,

$$\Delta I = 3,3 \lg (S_{\text{и}}(\omega) / S_{\text{эт}}(\omega))$$

— по методу взрывов,

где $S_{\text{и}}(\omega)$ и $S_{\text{эт}}(\omega)$ — спектральные плотности для различных частот на изучаемом и эталонном пунктах соответственно.

В качестве эталонных принимались записи микросейсм и взрыва в пунктах, расположенных вне зон тектонических нарушений на грунтах I категории по сейсмическим свойствам.

Полученные в результате измерений средние значения приращений сейсмической интенсивности в инженерном диапазоне частот 1—10 Гц для изученных зон тектонических нарушений представлены в табл. 2 и 3.

Таким образом, по результатам инструментальных сейсмологических исследований в пределах двух разломно-трещинных зон установлены приращения интенсивности, превышающие значения $\Delta I = 0,5$ балла относительно грунтов I категории по сейсмическим свойствам:

- для Староднепровской зоны (псн № 2, 3, рис. 2) $\Delta I_{\text{ср}} = + 0,78$ балла;

- для зоны северо-западного простирания (псн № 8) $\Delta I_{\text{ср}} = + 0,58$ балла (см. табл. 2).

Согласно существующей методике, для этих зон необходимо принимать округленные значения $\Delta I = + 1$ балл относительно грунтов I категории по сейсмическим свойствам или $\Delta I = 0$ баллов относительно грунтов II категории. Основным фактором, влияющим на уровень приращения сейсмической интенсивности в этих зонах, является значительная степень дезинтеграции пород и изменения их физико-механических свойств.

Т а б л и ц а 2. Приращение сейсмической интенсивности в зонах тектонических нарушений по методу микросейсм

Номер псн в пределах изучаемых зон	Пункт наблюдений	Эталонные псн	Приращение сейсмической интенсивности по компонентам ΔI , балл			Среднее приращение ΔI , балл
			WE	Z	NS	
2	Гранитный карьер, западно-юго-западный фланг Староднепровской зоны	1, 4	$\frac{+ 1,00}{0}$	$\frac{+ 0,82}{- 0,18}$	$\frac{+ 0,74}{- 0,26}$	$\frac{+ 0,85}{- 0,15}$
3		1, 4	$\frac{+ 1,10}{+ 0,10}$	$\frac{+ 0,63}{- 0,37}$	$\frac{+ 0,41}{- 0,59}$	$\frac{+ 0,71}{- 0,29}$
			Среднее:			+ 0,78 - 0,22
6	Гранитный карьер, разломно-трещинная зона, соответствующая линеаментной зоне № 4	5	$\frac{+ 0,22}{- 0,78}$	$\frac{0,0}{- 1,00}$	$\frac{+ 0,23}{- 0,77}$	$\frac{+ 0,15}{- 0,85}$
8	Гранитный карьер, разломно-трещинная зона с простираием 295°	7	$\frac{+ 0,92}{- 0,08}$	$\frac{+ 0,52}{- 0,48}$	$\frac{+ 0,30}{- 0,70}$	$\frac{+ 0,58}{- 0,42}$
11	Верхняя потеряна плотины (над разломно-трещинной зоной)	10, 12	$\frac{+ 0,14}{- 0,86}$	$\frac{+ 0,11}{- 0,89}$	$\frac{+ 0,32}{- 0,68}$	$\frac{+ 0,19}{- 0,81}$
9		10, 12	$\frac{- 0,07}{+ 0,93}$	$\frac{- 0,02}{+ 0,98}$	$\frac{+ 0,10}{- 0,90}$	$\frac{0,0}{- 1,00}$
			Среднее:			+ 0,10 - 0,90

В псн № 6 (в пределах линеаментной зоны 4) среднее приращение сейсмической интенсивности по методу микросейсм составило $\Delta I = + 0,15$ балла, или округленно $\Delta I = 0$ баллов относительно грунтов I категории по сейсмическим свойствам (см. табл. 2). Близкие значения (+ 0,23) приращения сейсмической интенсивности для этой зоны получены и по методу взрывов (см. табл. 3).

Над зоной тектонического нарушения в потеряне плотины Днепровской ГЭС (псн № 11, 9) среднее приращение балльности составило $\Delta I = + 0,10$ балла или округленно $\Delta I = 0$ баллов относительно грунтов I категории по сейсмическим свойствам. Нулевые приращения балльности и отсутствие видимых деформаций

в потеряне плотины свидетельствуют об устойчивости этого сооружения по отношению к существующим геодинамическим явлениям и сейсмическим воздействиям. Следует отметить, что в результате обследования Заводского района г. Запорожье, находящегося на предполагаемом восточно-северо-восточном продолжении Староднепровской зоны, деформаций зданий и сооружений, свидетельствующих о тектонической активизации этой зоны, выявлено не было.

Выводы. Результаты проведенных детальных геолого-структурных и инструментальных сейсмологических исследований на участке размещения Днепровской ГЭС позволяют констатировать следующее.

Т а б л и ц а 3. Приращение сейсмической интенсивности в зонах тектонических нарушений по методу взрывов

Номер псн в пределах изучаемых зон	Пункт наблюдений	Эталонный псн	Приращение сейсмической интенсивности по компонентам ΔI , балл			Среднее приращение ΔI , балл
			WE	Z	NS	
6	Гранитный карьер, разломно-трещинная зона, соответствующая линеamentной зоне № 4	5	$\frac{+ 0,36}{- 0,64}$	$\frac{+ 0,17}{- 0,83}$	$\frac{+ 0,17}{- 0,83}$	$\frac{+ 0,23}{- 0,77}$

Примечание. В табл. 2 и 3 в числителе — приращение сейсмической интенсивности относительно грунтов I категории, в знаменателе — относительно грунтов II категории по сейсмическим свойствам.

1. Структурный рисунок территории размещения Днепроvской ГЭС определяют, в основном, тектонические разрывы двух систем: полигенетические (с точки зрения кинематических обстановок их формирования) нарушения северо-восточной ориентировки в широком диапазоне азимутов простираний и субширотные структуры, составляющие единый структурно-кинематический парагенезис с трещинными структурами меридионального простирания. К первой из этих систем относится зона Староднепровского тектонического нарушения, фрагменты которой были зафиксированы в основании плотины Днепроvской ГЭС в процессе ее возведения, в гранитном карьере и на левом берегу о-ва Хортица в ходе проводимых исследований.

2. Преобладание крутопадающих тектонических разрывов и наличие зеркал скольжения сдвигового и (в меньшем количестве) сбросо-сдвигового типов свидетельствуют о доминирующей структурообразующей роли в регионе сдвиговых деформационных режимов, обусловленных обстановками субгоризонтального сжатия — растяжения. Структурно-кинематическая идентификация тектонических разрывов и характер вторичных смещений, уверенно устанавливаемый по зеркалам скольжения, отражают наличие обстановок субширотного сжатия — субмеридионального растяжения, которые в настоящее время определяют особенности проявления сейсмогенеза в пределах УЩ, что подтверждается параметрами механизма очага Криворожского землетрясения 25.12.2007 г. В этих условиях тектоническая активизация Староднепровского разлома в новейшее время вполне вероятна, однако его пространственные параметры (дли-

на, мощность зоны динамического влияния) не позволяют отнести это нарушение к разряду потенциально сейсмогенерирующих структур.

3. К числу основных факторов, способных оказать негативное влияние на безопасность функционирования гидроузла Днепроvской ГЭС, могут быть отнесены:

- высокая вероятность проявления современных криповых подвижек;

- увеличение интенсивности сейсмических воздействий при сильных землетрясениях вследствие перераспределения сейсмической энергии в зонах дезинтегрированных пород тектонических нарушений.

4. Расчетные значения сейсмических воздействий с учетом локальных инженерно-геологических и тектонических условий составят:

- для основания плотины Днепроvской ГЭС в целом: ПЗ — $I_0 = 4,0$ балла по шкале MSK-64 с периодом повторяемости $T = 500$ лет и сейсмическим риском $P = 10\%$; МРЗ — $I_0 = 5,0$ баллов по шкале MSK-64 с периодом повторяемости $T = 5000$ лет и сейсмическим риском $P = 1\%$;

- для зон тектонических нарушений, пересекающих участок размещения плотины, ПЗ — $I_0 = 5,0$ балла по шкале MSK-64 с периодом повторяемости $T = 500$ лет и сейсмическим риском $P = 10\%$; МРЗ — $I_0 = 6,0$ баллов по шкале MSK-64 с периодом повторяемости $T = 5000$ лет и сейсмическим риском $P = 1\%$.

5. Для большей достоверности полученные результаты следует дополнить комплексом геолого-геофизических и сейсмологических исследований, включая буровые работы с определением физико-механических свойств грунтов и регистрацию землетрясений различных энергий.

6. Результаты проведенных работ свидетельствуют о необходимости выполнения детальных геолого-структурных и сейсмологических исследований для других промплощадок каскада Днепровских ГЭС, располагающихся, согласно картам общего сейсмического районирования территории Украины ОСР-2004 [Будівництво ..., 2006], в зонах с про-

гнозируемой интенсивностью сейсмических воздействий $I_0 = 6$ баллов.

Благодарности. Авторы признательны за содействие и помощь, оказанные им в ходе исследований, сотрудникам Днепровской ГЭС: директору В.Г.Кучеру, нач. гидроцеха Б.А. Рудыку, инж. Г.Н. Шевченко, а также гл. инж. ОАО "Запорожское карьероуправление" М.Г. Минасенко.

Список литературы

- Ангрущенко Ю.А., Кутас В.В., Кенгзера А.В., Омельченко В.Д., Гордиенко Ю.А., Калитова И.А. Природа сейсмических событий, зарегистрированных на западе Украинского щита в 2005—2007 гг. // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 2. — С. 64—74.
- Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН України В.1.1.12-2006. — Київ: ДП Укрархбудінформ, 2006. — 84 с.
- Бунэ В. И., Полякова Т. П., Рагу К. Анализ карт изосейст вранчских землетрясений 10 ноября 1940 года и 4 марта 1977 года // Детальные инженерно-сейсмологические исследования. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 27. — Москва: Наука, 1986. — С. 126—135.
- Верховцев В.Г. Оцінка безпеки району розташування Дніпровської ГЕС на основі неотектонічних критеріїв: Звіт по НДР / Ін-т геол. наук НАН України. — Київ, 2010 — 35 с.
- Габсатарова И.П., Бабкова Е.А. Инструментальные параметры Новодарьевского землетрясения 11 мая 2004 г. с $M_S = 3,8$ (Украина, Луганская обл.) // Сейсмол. бюл. Украины за 2004 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2006. — С. 124—131.
- Габсатарова И.П., Бабкова Е.А. Параметры Бердянского землетрясения 31 июля 2006 г. с $M_S = 3,3$ (Украина, Запорожская обл.) // Сейсмол. бюл. Украины за 2006 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2008. — С. 18—26.
- Гинтов О.Б. Планетарные деформации земной коры, ротация Земли и движения литосферных плит // Геофиз. журн. — 2001. — 23, № 4. — С. 69—82.
- Друмя А.В., Степаненко Н.Я. Карта максимальных возможных землетрясений сейсмического района Вранча // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1972. — № 10. — С. 77—78.
- Кармазин П.С., Князева В.С., Скляр А.М. Макро-
- сейсмический эффект в Северном Причерноморье // Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. — Москва: Наука, 1979. — С. 186—191.
- Карта неотектоники юго-запада СССР. — 1:1000000 / Ред. А.М. Маринич. — Москва: ГУГК, 1987. — 4 л.
- Кенгзера А.В., Скляр А.М., Роман А.А., Исичко Е.С., Ильеш И.И., Старогуб Г.Р., Князева В.С. О возможности использования эмпирических передаточных функций среды при микрорайонировании территории со сложным геологическим строением // Оценка эффекта сильных землетрясений. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 30. — Москва: Наука, 1989. — С. 82—89.
- Князева В.С., Королев В.А., Костюк О.П., Пронишин Р.С., Пустовитенко А.Н., Сафронов О.Н., Седова В.И., Скляр А.М. Макросейсмические данные о проявлении на территории Украины карпатских землетрясений 30 и 31 мая 1990 г. // Сейсмол. бюл. Западной зоны ЕСН Украины и Молдовы за 1990 г. — Киев: Наук. думка, 1994. — С. 188—192.
- Кондорская Н.В., Захарова А.И., Друмя А.В., Ананьин И.В., Пустовитенко Б.Г., Раутиан Т.Г., Чепкунас Л.С., Пронишин Р.С., Москаленко Т.П., Руденская И.М., Королев В.А., Князева В.С., Скляр А.М. Землетрясение Вранча 30 августа // Землетрясения в СССР в 1986 году. — Москва: Наука, 1989. — С. 13—28.
- Левицкий Л.Л., Шпак В.В. Днепровская ГЭС им. В.И. Ленина. Бетонная водосливная плотина. Периодическое техническое освидетельствование. Материалы по натурным наблюдениям. Оценка скального основания и тела плотины: Геол. отчет. Ч.1. — Запорожье: Гидропроект, 1990. — 148 с.
- Новик Н.Н., Вольфман Ю.М. Эволюция планетарных полей напряжений в пределах сейсмоактивных регионов Украины, новейшие раз-

- рывы и разрывные смещения // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. — Симферополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 1997. — С. 81—90.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. Раздел Крым — Нижняя Кубань /* Ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин. — Москва: Наука, 1977. — С. 55—68.
- Определение интенсивности проектного и максимального расчетного землетрясения для площадок Киевской, Каневской, Кременчугской, Днепродзержинской, Днепроградской и Каховской ГЭС (по литературным и фондовым материалам): Отчет по теме 7с-97 /* А. М. Скляр, В. Е. Кульчицкий, О. Н. Сафронов. — Симферополь; Киев, 1997. — 123 с.
- Полный каталог исторических землетрясений Крыма /* Ред. Н. В. Шебалин, исполнители: А. Г. Каменобродский, В. Е. Кульчицкий, И. И. Попов, Б. Г. Пустовитенко / Рукопись. Фонды отдела сейсмологии Ин-та геофизики НАН Украины. — Симферополь, 1975. — 32 с.
- Пронишин Р. С., Вербицкий С. Т., Стасюк А. Ф.* Микулинецкое землетрясение 3 января 2002 года // Сейсмол. бюл. Украины за 2002 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2004. — С. 97—114.
- Пустовитенко Б. Г.* Уроки разрушительных крымских землетрясений 1927 года // Сб. матер. междунар. науч. конф. "Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму)". Ялта, 2007. — Симферополь: Изд. Крым. эксперт. совета, ИГФ НАН Украины, 2007. — С. 3—5.
- Пустовитенко А. Н., Свиглова В. А., Князева В. С., Бушмакина Г. Н.* Бердянское землетрясение 31.07.2006 г. // Сейсмол. бюл. Украины за 2006 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2008. — С. 27—30.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пустовитенко А. А., Скляр А. М.* Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 2. — С. 75—97.
- Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства /* Под ред. С. А. Федорова. — Москва: Госстрой СССР, 1985. — 136 с.
- Ризниченко Ю. В., Друмя А. В., Степаненко Н. Я.* Сейсмичность и сотрясаемость Карпато-Балканского региона. — Кишинев: Штиинца, 1976. — 118 с.
- Свиглова В. А.* Подробные данные о землетрясении в Луганской области Украины за 2004 год // Сейсмол. бюл. Украины за 2004 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2006. — С. 35—36.
- Скляр А. М., Князева В. С., Останин А. М.* Макросейсмический эффект Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмол. бюл. Украины за 2007 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2009. — С. 14—16.
- Тектонічна карта України масштабу 1 : 1 000 000 /* Гол. ред. Д. С. Гурський, С. С. Круглов. — Київ: Держ. геол. служба України, 2004. — 1 л.