

Возбуждение землетрясений при наполнении водохранилищ. Суперпозиция прямых и косвенных воздействий на местную геологическую среду

© П. В. Анахов¹, Н. В. Макарец², 2016

¹ Государственный университет телекоммуникаций, Киев, Украина

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Поступила 17 июня 2014 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кенгзерой

Розглянуто геофізичні поля депресійної зони водосховища, розміри і тривалість існування якої зумовлені дальністю дії і циклами полів. Виконано аналіз впливу поля мікросейсмічних коливань і місцевого клімату водосховищ. Розглянуто потенційно сейсмогенні геофізичні поля у прилеглий суші. Запропоновано модель суперпозиції прямих і непрямих впливів на сейсмічно активний розлом.

Ключові слова: геофізичне поле, депресійна зона водосховища, мікросейсми.

Введение. Эффект возбуждения землетрясений наполнением водохранилищ был обнаружен в прошлом веке [Gupta, Rastogi, 1976]. Одна из моделей очага мелкофокусных землетрясений базируется на нарушении сплошности среды и образовании микротрещин. Они зарождаются под влиянием растущих тектонических напряжений в горных породах, перерастая в макротрещины (разломы) [Страхов, Савин, 2013]. Процесс может стать лавинообразным, завершаясь разрывом среды и движением ее блоков с шероховатыми краями в разные направления [Khachiyan, 2011].

Наполнение водохранилища создает депрессионную зону, размеры которой обусловлены дальностью действия возникших геофизических полей, а длительность существования соответствует циклам этих полей [Анахов, 2013]. Воздействия на тектонические разломы способны вызвать их активность в пределах изменений уровня подземных вод, полей деформаций и микросейсмических колебаний. При этом цикл микросейсм определяют его составляющие: вибрации от падающей воды, агрегатов электростанций и мощных насосов; длиннопериодные вариации уровня воды; колебания тела плотины; штормовые микросейсмы.

Сейсмогенные геофизические поля в депрессионной зоне. Под геофизическими полями будем понимать физические поля Земли, а также поля, представленные заданными в пространстве значениями их геодинамических параметров — уровня подземных вод, амплитуд полей деформаций и микросейсмических колебаний [Adushkin et al., 2012]. Характеристика полей, способных вызвать активность тектонических разломов в депрессионной зоне водохранилища, приведена в табл. 1 и на рис. 1—5.

Микросейсмогенные процессы, составляющих спектр колебаний, описаны в табл. 2.

Микросейсмические колебания малой амплитуды на активном разломе (нарушении сплошности) накапливают остаточные деформации одного знака, что увеличивает скорость деформации и ведет к слабой сейсмичности [Adushkin et al., 2009].

Смещения во фрагменте разлома в процессе усталостного воздействия и число таких воздействий определяют значение интеграла суммарного повреждения [Островский, 1990]:

$$E(N) = \int_0^N \frac{dN}{N_f(\Delta\varepsilon)},$$

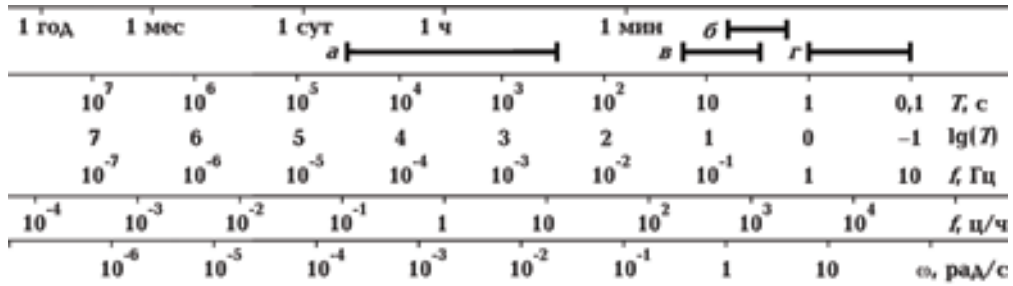


Рис. 1. Полосы частот микросейсмических шумов различного происхождения в депрессивной зоне водохранилища: *a* — сейшевое происхождение (по Л. Титову); *b* — пульсации давления на водобое (по И. Ершову); *v* — штормовые микросейсм (по Ф. Монахову); *г* — колебания тела плотины (по Н. Капустян).

Т а б л и ц а 1. Геофизические поля депрессионной зоны водохранилища [Anakhov, 2013]

Параметр	Процесс	Размеры зоны	Цикл поля
Уровень подземных вод	Изменение порового давления флюида	Ширина зоны гидрогеологического влияния подземной призмы фильтрационных вод обычно колеблется в пределах 0,1—0,5 км, хотя известны случаи, когда влияние сказывается до 6 км [Водоохранилища ..., 1991]. Глубина распространения жидкой фазы воды достигает 35 км (в геологических структурах допалеозойского возраста) [Швец, 1988]	Зоны подпора грунтовых вод характеризуются двумя стадиями формирования: интенсивного подъема, когда формируется 70—90 % подпора (продолжительность составляет чаще всего 5—10 лет, на отдельных водохранилищах 2—3 года); замедленного подъема до предельного положения (продолжительность 15—20 лет и более) [Водоохранилища ..., 1986]. Этот процесс оценивается временем $t = L^2 / 4\pi K_D$, где L — дальность распространения флюида в среде; K_D — водопроницаемость пласта [Parotidis et al., 2003]
Амплитуда поля деформаций	Опускание земной поверхности	По оценкам [Количко, 1998], объем воронки опущенной земной поверхности на два порядка превышает объем водохранилища, прогиб распространяется в стороны от водохранилища на десятки километров [Тетельмин, 2009]. Максимальная глубина проседающих слоев принята равной толщине земной коры (около 20 км), ограниченной поверхностью Мохоровичича [Тетельмин, 2009]	Время релаксации, в течение которого начальное напряжение в коре уменьшается в e раз, может составлять от 2,5 до 30 лет [Молоков, 1985; Количко, 1998; Тетельмин, 2009]
Амплитуда поля деформаций микросейсмических колебаний	Вибрации (см. рис. 1)	Эффективный радиус влияния	Определяются микросейсмогенными процессами

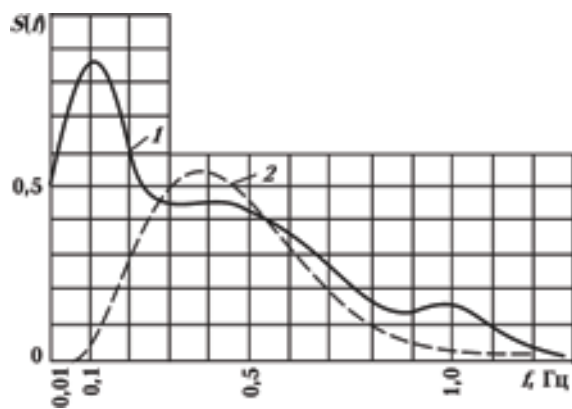


Рис. 2. Спектральная плотность пульсации давления за водосбросным сооружением (на водобое) [Иванов, 2004]: 1 — измеренная, 2 — рассчитанная.

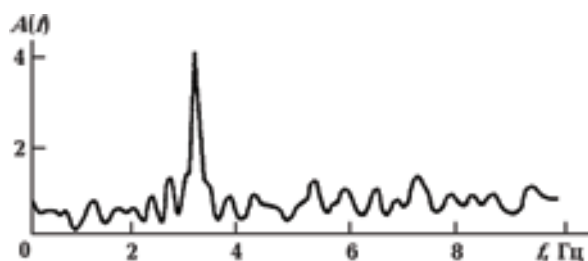


Рис. 3. Спектр микросейсм, возбуждаемых работой агрегатов Нурекской ГЭС, Таджикистан (основной пик — на частоте 3, (3) Гц) [Капустян, 2003].

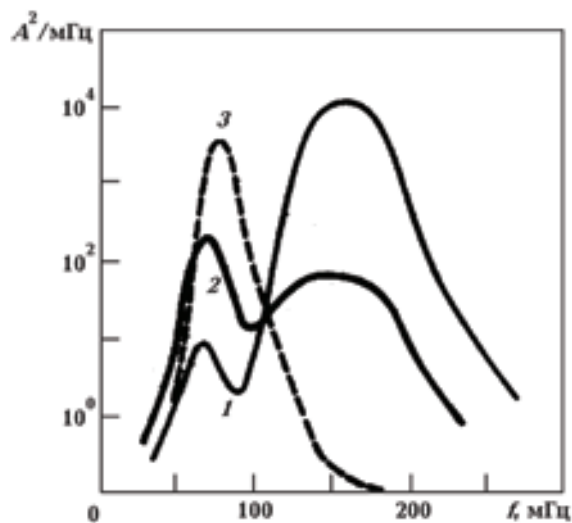


Рис. 4. Обобщенные спектры микросейсм на суше (1), морских волн в прибрежной зоне на малой глубине (2), морских волн в открытом океане (3) [Монахов, 1977].

где N — количество циклов воздействия; N_f — количество циклов с амплитудой деформации $\Delta\epsilon$, необходимых для разрушения (характеристика материала). Согласно гипотезе Пальмгрена—Майнера, при $E(N_f) = 1$ наступает усталостное разрушение. Поскольку $N_f(\Delta\epsilon)$ — спадающая функция, то наибольший вклад в интеграл вносят циклы максимальной амплитуды, разрушение будет наиболее вероятным, когда $\Delta\epsilon$ наибольшие.

Установлено, что параметры фильтрации флюидной фазы и напряжения на разрывных нарушениях в коре наиболее чувствительны к мно-

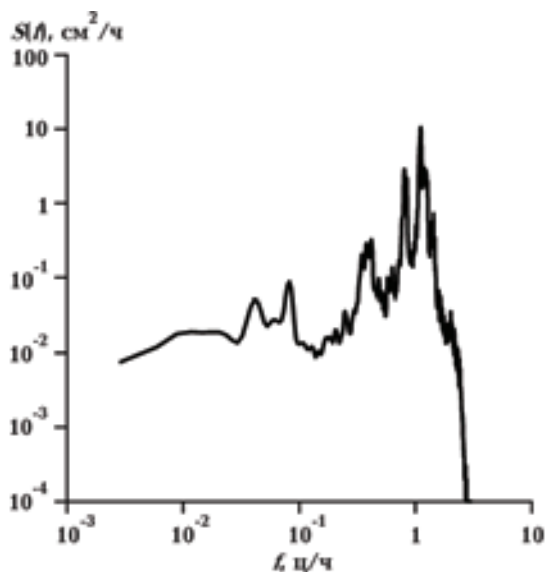


Рис. 5. Спектр колебаний уровня воды на станции “Севастополь” за период с 02.05 по 30.07 2001 г: выделяются приливообразующие периоды вращения Солнца ($f \approx 0,042$ ц/ч) и Луны ($f \approx 0,081$ ц/ч); одно- ($f \approx 0,400$ ц/ч), двух- ($f \approx 0,800$ ц/ч) и трехузловые ($f \approx 1,111$ ц/ч) сейшевые колебания [Горячкин и др., 2002].

гократным периодическим изменениям плотности вещества, а их изменения приводят к перестройке внутренних напряжений [Капустян, 2002; Adushkin et al., 2012]. Совместное насыщение водой и вибрации изменяют состояние разлома: уменьшаются трение на плоскости смещения и сцепление, увеличивается поровое давление. В результате состояние разлома может стать критическим и начнется скольжение, даже если уровень первичных напряжений намного меньше критического [Mukhamediev, 2010].

Согласно [Пат., 2006 а], реакция разломов на вибрацию во многом обусловлена количеством

жидкой фазы в их зоне. Для разгрузки тектонического напряжения проводится совместное насыщение водой и вибрации для снятия упругой энергии в напряженных средах, т. е. предотвращения землетрясений [Пат., 2006 б].

Эффективный радиус влияния микросейсмических колебаний зависит от их затухания,

которое определяется, во-первых, геометрическим расхождением и рассеиванием энергии, во-вторых, поглощением сейсмической энергии в среде. Величину поглощения можно оценить по формуле [Sheriff, Geldart, 1982]

$$\alpha = E_0 \exp(-\beta t) \cos(2\pi f_{\mu} t),$$

где E_0 — энергия волны в источнике, β — ко-

Т а б л и ц а 2. Микросейсмогенные процессы в депрессионной зоне водохранилища

Процесс	Характеристика колебаний	Параметры	Рисунок
Колебания тела плотины	Полоса частот: 1—10 Гц [Капустян, 2002]; 5—10 Гц [Козлов, Воронова, 2005]	Скорость 0,2—3,0 мкм/с [Капустян, 2002]; амплитуда от 1—2 до 3—4 мкм [Рекомендации ..., 2000]	1, г
Вариации уровня воды: при наполнении водохранилища	Водохранилище Мид объемом 35,2 км ³ было наполнено за 1,5 года [Rogers, 2010].	Прогиб земной коры за 15 лет составил 17 см, за 28 лет — 20 см [Тетельмин, 2009]	—
определяемые циклами пополнения	Водохранилища многолетнего, сезонного, месячного, недельного, суточного регулирования		
Вибрации от падающей воды	Спектр колебаний, возбуждаемых водобоем, составляет 0,3—0,6 с [Ершов, 1967]	На водосливных секциях при работающих водосбросах амплитуда колебаний в несколько раз больше 3—4 мкм [Рекомендации ..., 2000]	1, б, 2
Вибрации от агрегатов электростанций и мощных насосов	На частоте основного тона $f_{\mu} = f_N / N_e$ и на кратных частотах $n \cdot f_{\mu}$, где f_N — частота тока в электросети; N_e — количество пар полюсов машины, $n = 1, 2, \dots, n$ [Капустян, 2002]	Вблизи Нурекской ГЭС амплитуда смещений почвы для основного тона около 1 мкм. Сигнал зарегистрирован на расстоянии до 70 км [Капустян, 2003]	3
Штормовые микросейсмические, возникающие в результате передачи в земную кору энергии волн	Спектр содержит максимумы на частотах 220 и 540 циклов/ч (ц/ч) [Монахов, 1977]	Микросейсмические частотой 540 ц/ч, эпицентры которых находятся в Баренцевом море и на оз. Иссык-Куль, были приняты сейсмическими станциями Казахстана [Дубровин, Смирнов, 2009]	1, в, 4
Естественные колебания уровня: сейшевые	0,167—30 ц/ч [Titov, 1971]; 0,038—1,364 ц/ч [Арсеньева и др., 1963]; 0,070—30 ц/ч [Kodomari, 1982]	Спектр колебаний уровня на станции «Севастополь» [Горячкин и др., 2002]	1, а, 5
приливно-отливные	Приливообразующие периоды вращения Солнца ($T \approx 24$ ч) и Луны ($T \approx 12$ ч)		
метеорологические и сезонные	—		

эффицент затухания, t — время, f_{μ} — частота микросейсм.

Климатические факторы сейсмической активности на прибрежной территории. Согласно территориальной классификации воздействия на окружающую среду район водохранилища можно разделить на два подрайона — чаша водохранилища и прилегающая территория [Водохранилища ..., 1986]. Воздушные массы над системой водохранилище—суша формируют здесь местный климат. По мере удаления от водохранилища степень его влияния на территорию уменьшается [Авакян, Широков, 1990]. Суммарная площадь суши, находящейся под климатическим влиянием водохранилища, для больших равнинных водохранилищ обычно не превышает площади их водного зеркала, для малых — она меньше [Авакян, Широков, 1990].

Практически значимые границы физического влияния акватории на метеорологический режим и границы влияния на другие физико-географические процессы прибрежной зоны равны 1—3 км [Вендров, Дьяконов, 1976]. Границы зоны влияния могут достигать 10 км, на крупных озерах — 30—45 км [Вендров, Дьяконов, 1976; Вуглинский, 1991].

Для определения ширины зоны климатического влияния в безледоставное время года на побережье малых водохранилищ можно использовать график (рис. 6), составленный на основании данных, полученных для условий Беларуси.

Ширину зоны климатического влияния водохранилища определяет его тепловой цикл, в котором выделены две фазы — теплонакопление и теплорассеяние. На рис. 7 показана структура годового цикла для водоемов.

Влияние атмосферного электричества на тектонические деформации. Образование водоемов приводит к увеличению испарения с водной поверхности [Авакян, Широков, 1990; Методические ..., 2003]. Согласно модели Дальтона, испаряемость с единицы площади в данной точке поверхности вычисляется следующим образом [Korzukhin et al., 2011]:

$$E_{pot} (T_{evap}, T_{air}, W) =$$

$$= \rho (T_{air}) G (W) [e_{sat} (T_{evap}) - e_{air}] / p,$$

где T_{evap} — температура испаряющей поверхности; T_{air} — температура воздуха на высоте 2 м; W — скорость ветра в направлении по касательной к поверхности; ρ — плотность сухо-

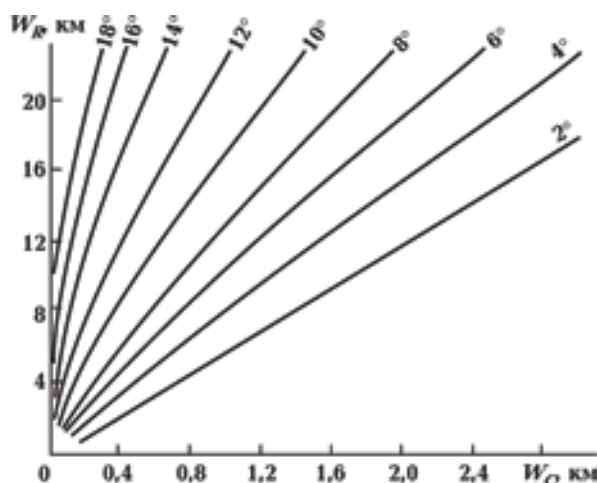


Рис. 6. Зависимость ширины зоны климатического влияния водохранилища от его величины и крутизны прилегающих склонов [Водохранилища ..., 1991]; W_R — ширина водоема; W_C — ширина зоны климатического влияния.

го воздуха; G — проводимость на пути испаряющая поверхность — атмосфера; $e_{sat} (T_{evap})$ — давление насыщенного водяного пара при температуре испаряющей поверхности воды; e_{air} — парциальное давление водяного пара; p — атмосферное давление.

Увеличение влажности воздуха над поверхностью водохранилищ изменяет режим облачности [Водохранилища ..., 1986]. Под облаками повышается напряженность электрического поля, особенно в районе мощных грозных обла-

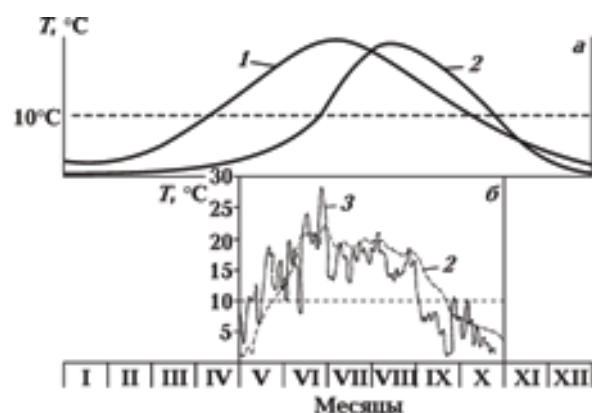


Рис. 7. Структура годового цикла: а — фазы гидрологического режима для водоемов умеренной зоны [Николаев, 1971]; б — ход температур воды и воздуха на Камском водохранилище, г. Добрянка, 58° с. ш. [Авакян и др., 1987]; 1 — солнечная радиация (освещенность); 2 — температура воды; 3 — температура воздуха.

ков. Согласно работе [Френкель, 2007], средняя напряженность возрастает примерно в 100 раз относительно ее значения в безоблачных районах, составляя 10 кВ/м и более.

В ответ на воздействие электрического поля формируется комплекс сейсмогенных откликов среды: движение воды и взвешенных в ней частиц (обратный электрокинетический эффект), деформации отдельных кварцевых включений в горных породах (обратный пьезоэффект), деформации кристаллов (электрострикция), а также вызванные полями среды вариации электромагнитных свойств [Анахов, Макарець, 2013].

Поровое давление флюидов. В зоне влияния водохранилищ изменяется количество выпадающих осадков. На побережье оно несколько увеличивается по сравнению с материком [Авакян, Широков, 1990]. Вопрос о влиянии водохранилищ на режим осадков в прибрежной зоне рассмотрен на примерах Волгоградского водохранилища речного типа, расположенного в степной зоне России, Каттакурганского (Узбекистан) и Чардаринского (Казахстан) водохранилищ озерного типа, расположенных в полупустынной зоне. Был выполнен анализ средних многомесячных и годовых сумм осадков за периоды до и после создания водохранилищ (табл. 3).

Атмосферные осадки являются существенным фактором формирования инфильтрационного питания. Если проницаемость грунтов велика, а грунтовые воды располагаются близко к поверхности, то даже в случае кратковременных осадков их уровень может повышаться до 20—40 см в результате поступления воды по трещинам в почве [Шестаков, 1995; Costain, Volinger, 2010].

При естественном обводнении зоны Ангарского разлома (Иркутская обл., Россия) дождями уровень воды повышался на 30—50 см и более. Результатом стало заметное повышение скорости и амплитуды смещения в зоне разлома. В эксперименте с искусственным насыщением разлома водой были инициированы сравнительно плавные и медленные, но достаточно большие по амплитудам смещения краев разлома [Пат., 2006 а].

Вибрации. При создании водохранилищ изменяется суточный ход скорости ветра. На побережье максимальная скорость отмечается в дневные часы, а минимальная — в ночные. Это связано с изменением интенсивности вертикального обмена в атмосфере в течение суток над побережьем и водной поверхностью [Водохранилища ..., 1986].

Т а б л и ц а 3. Изменение средних значений осадков, %, за период после строительства водохранилища по сравнению с периодом до его создания [Вуглинский, 1991]

Водохранилище	Сравнимые периоды	Месяцы												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Волгоградское	(1941—1957) / (1961—1975)	33	0	13	5	48	29	59	6	15	10	46	-22	20
Каттакурганское	(1920—1937) / (1955—1975)	30	-19	8	14	-3	20	0	0	0	0	10	0	3
Чардаринское	(1937—1964) / (1968—1974)	-19	11	27	6	0	71	50	0	0	0	19	19	10

Термические контрасты между сушей и водой приводят к возникновению местной циркуляции — бризов. Бризовые ветры на крупных водохранилищах с пологими берегами захватывают полосу суши, часто превышающую 2—3 км [Методические ..., 2003; Водохранилища ..., 1986; Авакян и др., 1987]. Коэффициент усиления ветра из-за бризовой циркуляции по данным [Методические ..., 2003] на расстоянии 400 м от уреза воды составил 1,5—2,0 в осенне-зимний период, 1,4—1,6 весной и 1,5—1,9 летом.

На краю Ангарского разлома располагается башня телескопа высотой 30 м, фундамент которой встроена в один из краев разлома. В бурю порывы сильного ветра сильно ее раскачивают. Эти упругие колебания инициируют вибрации с периодом 3—4 с (0,25 Гц), которые передаются через фундамент башни. Таким образом, во время бури действует низкочастотный вибратор и оказывает механическое сдвиговое воздействие на один из краев разлома [Пат., 2006 а].

Заключение. Факт возбуждения землетрясений при наполнении водохранилищ не подвергается сомнению. Модель очага для мелкофокусных землетрясений [Khachiyan, 2011; Страхов, Савин, 2013] стала основой создания схемы развития событий, представленной на рис. 8, а [Анахов, 2013].

В последнее время отмечается связь сейсмичности территорий и погодных явлений [Пат., 2006 а; Costain, Bollinger, 2010; Анахов, Макарець, 2013]. Воздушные массы, взаимодействуя с водоемом и прилегающей сушей, создают местный климат. В результате возникают воздействия на твердь, которые могут быть сейсмогенными (рис. 8, б).

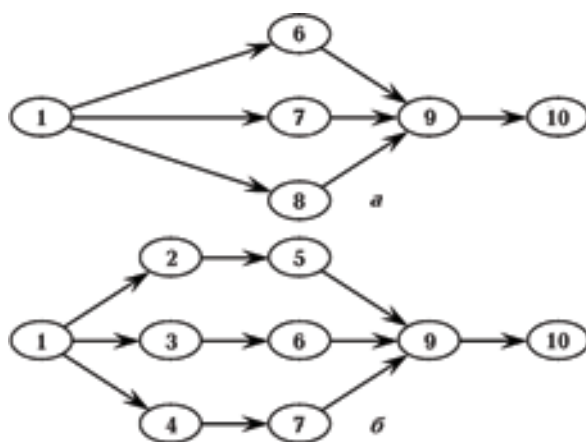


Рис. 8. Прямые (а) и косвенные (б) воздействия водохранилища на сейсмоактивный разлом: 1 — наполнение водохранилища; 2 — испарение с водной поверхности → повышение влажности воздуха → возникновение облачности; 3 — выпадение осадков; 4 — возникновение бриза; 5 — влияние атмосферного электричества на развитие деформаций (электросейсмический эффект); 6 — поровое давление флюида; 7 — деформация среды под действием вибраций; 8 — деформация среды при опускании поверхности; 9 — смещение крыльев разлома; 10 — землетрясение.

Сложность анализа воздействий на геологическую среду заключается во взаимной связи как воздействий, так и откликов на них. Поэтому разложение неделимого процесса возбуждения землетрясений на простые процессы с соизмеримыми результатами воздействий может восприниматься как геофизический идеализм. Предложенная в работе модель суперпозиции прямых и косвенных воздействий является попыткой интегральной оценки отклика среды на создание водохранилищ.

Список литературы

Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища. Москва: Мысль, 1987. 325 с.

Авакян А. Б., Широков В. М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск: Университетское, 1990. 240 с.

Анахов П. В. Можливість збудження землетрусу 26 квітня 1986 року в районі Чорнобильської АЕС наповненням охолоджувача: Матеріали ІХ Міжнарод. науч.-практ. конф. "Ефективні інструменти сучасної науки", Прага, 27 апреля — 5 мая 2013 г. Прага: Publ. Nou-se "Education and Science", С. 75—81.

Анахов П. В., Макарець М. В. Збудження землетрусів мікросейсмічними шумами і погодними явищами. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 3. С. 93—104.

Арсеньева Н. М., Давыдов Л. К., Дубровина Л. Н., Конкина Н. Г. Сейши на озерах СССР. Ленинград: Изд-во Ленин. ун-та, 1963. 184 с.

Венгров С. Л., Дьяконов К. Л. Водохранилища и окружающая среда. Москва: Наука, 1976. 136 с.

Водохранилища Белоруссии: природные особенности и взаимодействие с окружающей сре-

- дой. Отв. ред. В.М. Широков. Минск: Университетское, 1991. 207 с.
- Водохранилища и их воздействие на окружающую среду.* Отв. ред. Г.В. Воропаев, А.Б. Авакян. Москва: Наука, 1986. 367 с.
- Вуглинский В.С.* Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
- Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н., Хмара Т.В.* Сейши в Севастопольской бухте. *Наукowi праці УкрНДГМІ.* 2002. Вип. 250. С. 342—353.
- Дубровин В.И., Смирнов А.А.* Регистрация и параметризация микросейсм и микробаром по данным сети станций НЯЦ РК. *Вестник НЯЦ РК.* 2009. Вып. 2. С. 172—178.
- Ершов И.А.* Колебания основания и тела плотины при короткопериодных микросейсмах. В кн.: *Колебания земляных плотин. Вопросы инженерной сейсмологии.* Вып. 11. Москва: Наука, 1967. С. 20—43.
- Иванов В.М.* Совершенствование теории и методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при поверхностном режиме сопряжения бьефов. *Ползуновский вестник.* 2004. № 4. С. 186—200.
- Капустян Н.К.* Сейсмический мониторинг воздействий техногенных вибраций на земную кору: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ИФЗ РАН, 2002. 355 с.
- Капустян Н.К.* Техногенное вибровоздействие на литосферу — объект планетарных исследований XXI века. В кн.: *Проблемы геофизики XXI века.* Кн. 2. Москва: Наука, 2003. С. 213—244.
- Козлов А.Б., Воронова Л.С.* О свободных колебаниях бетонных плотин на мягких грунтах. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.* 2005. Т. 244. С. 134—137.
- Количко А.В.* Геомеханические аспекты влияния крупных водохранилищ на массивы горных пород. *Гидротехническое строительство.* 1998. № 7. С. 42—48.
- Методические указания по оценке влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду РД 153-34.2-02.409-2003.* Санкт-Петербург: ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 2003.
- Молоков Л.А.* Инженерно-геологические процессы. Москва: Недра, 1985. 206 с.
- Монахов Ф.И.* Низкочастотный сейсмический шум Земли. Москва: Наука, 1977. 96 с.
- Николаев И.И.* Очерк структуры и формирования годового лимнологического цикла водоемов умеренной зоны. В кн.: *Озера Карельского перешейка. Лимнологические циклы озера Красного.* Ленинград: Наука, 1971. С. 5—33.
- Островский А.А.* Возможная причина сезонной периодичности некоторых Калифорнийских землетрясений. *Докл. АН СССР.* 1990. Т. 313. № 1. С. 83—86.
- Пат. 2273035 РФ.* Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов. С.Г. Псахье, В.А. Попов, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, В.В. Ружич, О.П. Сmealин, С.А. Борняков. Опубл. 27.03.2006 а. Бюл. № 9.
- Пат. 2289151 РФ.* Способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений. К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, А.А. Лукк, С.Л. Юнга. Опубл. 10.12.2006 б. Бюл. № 34.
- Рекомендации по натурным исследованиям и постоянным наблюдениям за вибрацией гидротехнических сооружений электростанций П 73-2000.* Санкт-Петербург: ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 2000.
- Страхов В.Н., Савин М.Г.* Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 1. С. 4—11.
- Тетельмин В.В.* Воздействие строительства крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры. *Гидротехническое строительство.* 2009. № 11. С. 46—50.
- Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. Изд. 2-е, испр. Москва: КомКнига, 2007. 160 с.
- Швец В.М.* Достижения и перспективы развития гидрогеологии. В кн. *Проблемы рационального использования геологической среды.* Москва: Наука, 1988. С. 21—37.
- Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. 3-е изд. Москва: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
- Adushkin V. V., Kocharyan G. G., Pavlov D. V., Vinogradov E. A., Goncharov A. I., Kulikov V. I., Kulyukin A. A., 2009.* Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences* 426(1), 588—590. DOI:10.1134/S1028334X09040175.
- Adushkin V. V., Spivak A. A., Kharlamov V. A., 2012.* Effects of lunar-solar tides in the variations of geophysical fields at the boundary between the Earth's crust and the atmosphere. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48(2), 104—116. DOI:10.1134/S1069351312010016.
- Anakhov P. V., 2013.* Identification of reservoirs in respect of excitation of earthquakes. In: *Modern*

- scientific research and their practical application.* Odessa: Kupriyenko SV. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21303.pdf>. CID 213—166.
- Costain J.K., Bollinger G.A., 2010. Review: Research Results in Hydroseismicity from 1987 to 2009. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 100(5A), 1841—1858. DOI:10.1785/0120090288.
- Gupta H.K., Rastogi B.K., 1976. Dams and Earthquakes. Amsterdam: Elsevier, 229 p.
- Khachiyani E.E., 2011. On a simple method for determining the potential strain energy stored in the earth before a large earthquake. *J. Volcanol. Seismol.* 5(4), 286—297. DOI:10.1134/S0742046311040038.
- Kodomari S., 1982. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)* 7(2), 185—226.
- Korzukhin M.D., Kolosov P.A., Semenov S.M., 2011. Applying Dalton's law of potential evaporation rate over the territory of Russia and neighboring countries using long-term observation data. *Russian Meteorology and Hydrology* 36(12), 786—793. DOI:10.3103/S1068373911120028.
- Mukhamediev Sh.A., 2010. Prevention of strong earthquakes: Goal or utopia? *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46(11), 955—965. DOI:10.1134/S1069351310110054.
- Parotidis M., Rothert E., Shapiro S.A., 2003. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophys. Res. Lett.* 30(20), 12.
- Rogers J.D., 2000. Hoover Dam: Scientific Studies, Name Controversy, Tourist Attraction, and Contributions to Engineering: *Hoover Dam 75th Anniversary History Symposium*, 21—22 October, 2010. Las Vegas, 216—248.
- Sheriff R.E., Geldart L.P., 1982. Exploration Seismology. Vol. 1. Cambridge University Press. 261 p.
- Titov L.F., 1971. Wind-Driven Waves. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; Springfield, 244 p.

Reservoir filling triggered seismicity. Superposition of direct and indirect local geological environmental effects

© P. V. Anakhov, N. V. Makarets, 2016

Geophysical fields of depressed zone of reservoir with size and duration of existence caused by distance of action and cycles of fields are examined. Analysis of influence of microseisms and local climate of reservoirs has been conducted. Potentially seismogenic geophysical fields arising in the adjacent land have been examined. A model of the superposition of direct and indirect impacts on seismoactive fault has been proposed.

Key words: geophysical field, depressed zone of reservoir, microseisms.

References

- Avakyan A.B., Saltankin V.P., Sharapov V.A., 1987. Hydropower reservoirs. Nature of The World. Moscow: Mysl, 325 p. (in Russian).
- Avakyan A.B., Shirokov V.M., 1990. Complex use and protection of water resources. Minsk: Universitetskoe, 240 p. (in Russian).
- Anakhov P.V., 2013. Possibility of excitation of earthquake on April 26, 1986 near Chernobyl Nuclear Power Plant by reservoir: *Proc. of the IX International scientific-practical conference "Effective tools of modern science"*, Prague, April 27 — May 5, 2013. Prague: Publ. House "Education and Science", 75—81 (in Ukrainian).
- Anakhov P.V., Makarets M.V., 2013. Earthquakes excitation by microseismic noises and additional electromagnetic field appearing under action of natural phenomena. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(3), 93—104 (in Ukrainian).
- Arsen'eva N.M., Davydov L.K., Dubrovina L.N., Konkina N.G., 1963. Seiches of the Lakes of the USSR.

- Leningrad: Publ. House Leningrad State University, 184 p. (in Russian).
- Vendrov S.L., D'yakonov K.L., 1976. Reservoirs and the environment. Moscow: Nauka, 136 p.
- Reservoirs of Belarus: natural features and interactions with the environment, 1991. Ed. V.M. Shirokov. Minsk: Universitetskoe, 207 p. (in Russian).
- Reservoirs and their influence on the environment, 1986. Eds G.V. Voropaev, A.B. Avakyan. Moscow: Nauka, 367 p. (in Russian).
- Vuglinskiy V.S., 1991. Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 223 p. (in Russian).
- Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A., Repetin L.N., Khmara T.V., 2002. Seiches in Sevastopol Bay. *Naukovi pratsi UkrNDGMI* (is. 250), 342—353 (in Russian).
- Dubrovin V.I., Smirnov A.A., 2009. Recording and parametrization of microseism and microbaroms using data of NNC RK monitoring network. *Vestnik NYaTs RK* (is. 2), 172—178 (in Russian).
- Ershov I.A., 1967. Vibrations of foundation and body of dam at short-period microseisms. In: *Vibrations of earth dams. Questions of earthquake engineering*. Is. 11. Moscow: Nauka, 20—43 (in Russian).
- Ivanov V.M., 2004. Improvement of theory and methods for calculation hydrodynamic effects behind spillway at surface mode of pool connection. *Polzunovskiy vestnik* (4), 186—200 (in Russian).
- Kapustyan N.K., 2002. Seismic monitoring of the impacts of man-made vibrations on the Earth's crust: Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow: IPE RAS, 355 p. (in Russian).
- Kapustyan N.K., 2003. Man-caused vibration of lithosphere — object of planetary exploration of XXI century. In: *Problems of geophysic of XXI century*. V. 2. Moscow: Nauka, 213—244 (in Russian).
- Kozlov A.B., Voronova L.S., 2005. On the free vibrations of concrete dams on soft ground. *Izvestiya VNIIG behalf B.E. Vedeneeva* 244, 134—137 (in Russian).
- Kolychko A.V., 1998. Geomechanic aspects of large-scale reservoirs influence on the bodies of rocks. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* (7), 42—48 (in Russian).
- Guidance on the calculation of impact of hydraulic structures on the environment ПД 153-34. 2-02. 409-2003, 2003. St. Petersburg: JSC "VNIIG behalf B.E. Vedeneeva" (in Russian).
- Molokov L.A., 1985. Geotechnical processes. Moscow: Nedra, 206 p. (in Russian).
- Monakhov F.I., 1977. Low-frequency seismic noise of the Earth. Moscow: Nauka, 96 p. (in Russian).
- Nikolaev I.I., 1971. Structure and formation of the annual limnological cycle of reservoirs in the temperate zone. In: *Lakes of Karelian Isthmus. Red Lake limnological cycles*. Leningrad: Nauka, 5—33 (in Russian).
- Ostrovsky A.A., 1990. Possible cause of seasonal periodicity of some California earthquakes. *Doklady AN SSSR* 313(1), 83—86 (in Russian).
- Pat. 2273035. Russian Federation. 2006a. Method for controlling shifts mode in fragments of seismic-active tectonic fractures. S.G. Psakh'e, V.L. Popov, E.V. Shil'ko, S.V. Astafurov, V.V. Ruzhich, O.P. Smekalin, S.A. Bornyakov. Publ. 27.03.2006a. Bull. № 9 (in Russian).
- Pat. 2289151. Russian Federation. 2006b. Method of take down the elastic energy in stress environments to prevent earthquakes. K.M. Mirzoyev, A.V. Nikolaev, A.A. Lukk, S.L. Yunga. Publ. 10.12.2006b. Bull. № 34 (in Russian).
- Recommendations for field observations and ongoing monitoring of vibration of hydrostation П 73-2000, 2000. St. Petersburg: JSC "VNIIG B.E. Vedeneeva" (in Russian).
- Strakhov V.N., Savin M.G., 2013. Seismic hazard reduction: lost opportunities.
- Tetel'min V.V., 2009. Effect of building large-scale hydraulic engineering construction on isostatic state of crustal. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* (11), 46—50 (in Russian).
- Frenkel Ya.I., 2007. Theory phenomena of atmospheric electricity. Ed. 2nd. Moscow: KomKniga, 160 p. (in Russian).
- Shvets V.M., 1988. Achievements and prospects of development of hydrogeology. In: *Problems of rational use of the geological environment*. Moscow: Nauka, 21—37 (in Russian).
- Shestakov V.M., 1995. Hydro-geodynamic. 3rd ed. Moscow: MSU Publ., 368 p. (in Russian).
- Adushkin V.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., Vinogradov E.A., Goncharov A.I., Kulikov V.I., Kulyukin A.A., 2009. Influence of seismic vibrations on the development of tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences* 426(1), 588—590. DOI:10.1134/S1028334X09040175.
- Adushkin V.V., Spivak A.A., Kharlamov V.A., 2012. Effects of lunar-solar tides in the variations of geophysical fields at the boundary between the Earth's crust and the atmosphere. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48(2), 104—116. DOI:10.1134/S1069351312010016.
- Anakhov P.V., 2013. Identification of reservoirs in

- respect of excitation of earthquakes. In: *Modern scientific research and their practical application*. Odessa: Kupriyenko SV. URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21303.pdf>. CID 213—166.
- Costain J.K., Bollinger G.A., 2010. Review: Research Results in Hydroseismicity from 1987 to 2009. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 100(5A), 1841—1858. DOI:10.1785/0120090288.
- Gupta H.K., Rastogi B.K., 1976. Dams and Earthquakes. Amsterdam: Elsevier, 229 p.
- Khachiyan E.E., 2011. On a simple method for determining the potential strain energy stored in the earth before a large earthquake. *J. Volcanol. Seismol.* 5(4), 286—297. DOI:10.1134/S0742046311040038.
- Kodomari S., 1982. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)* 7(2), 185—226.
- Korzukhin M.D., Kolosov P.A., Semenov S.M., 2011. Applying Dalton's law of potential evaporation rate over the territory of Russia and neighboring countries using long-term observation data. *Russian Meteorology and Hydrology* 36(12), 786—793. DOI:10.3103/S1068373911120028.
- Mukhamediev Sh.A., 2010. Prevention of strong earthquakes: Goal or utopia? *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46(11), 955—965. DOI:10.1134/S1069351310110054.
- Parotidis M., Rothert E., Shapiro S.A., 2003. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophys. Res. Lett.* 30(20), 12.
- Rogers J.D., 2000. Hoover Dam: Scientific Studies, Name Controversy, Tourist Attraction, and Contributions to Engineering: *Hoover Dam 75th Anniversary History Symposium*, 21—22 October, 2010. Las Vegas, 216—248.
- Sheriff R.E., Geldart L.P., 1982. Exploration Seismology. Vol. 1. Cambridge University Press. 261 p.
- Titov L.F., 1971. Wind-Driven Waves. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations; Springfield, 244 p.