

УДК 550.83(26) + 550.343(3) + 550.84 + 551.435.6

Мониторинговые исследования геологических процессов на территории водохранилища Лэйк Мид (Невада, США) с момента его заполнения в 1935 г. до начала XXI в.

О. Н. Ковин

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: on_kovin@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 15 ноября 2021 г.)

Водоохранилища, сооруженные для контроля паводков, ирригации, энергоснабжения и снабжения питьевой водой, могут вызывать существенные изменения в геологических процессах на территории их расположения, климате, биосфере и экологической обстановке. В статье приводятся результаты широкомасштабных мониторинговых исследований водохранилища Лэйк Мид (Lake Mead) на реке Колорадо, штат Невада, проведенных по заказу Управления мелиорации (Bureau of Reclamation) Министерства внутренних дел США. Водоохранилище Лэйк Мид образовалось после создания плотины Гувер Дам (Hoover Dam) – одной из первых плотин на реке Колорадо. К исследованиям были привлечены специалисты из разных областей знаний – геологи, геофизики, океанографы, гидрогеологи и экологи. В результате исследований, возглавляемых Геологической службой США, были получены и проанализированы данные о динамике донных отложений, выявлены основные источники загрязнения вод и донных осадков, получены данные геодезических измерений проседания земной поверхности и сейсмичности по мере заполнения водохранилища. Анализ полученных данных позволил оценить прогнозную длительность полезной жизни водохранилища в более чем 400 лет.

Ключевые слова: *водохранилище, плотина, донные отложения, наведенная сейсмичность, геофизические исследования придонных отложений, оценка загрязнения вод.*

DOI: 10.17072/psu.geol.20.4.344

Введение

Водоохранилище Лэйк Мид было образовано в результате сооружения 221-метровой плотины Гувер Дам в Черном Каньоне (Black Canyon) реки Колорадо (Colorado River) в 1935 г. (Rogers J.D., 2010). Оно частично расположено в юго-восточной части штата Невада и северо-западной части штата Аризона (рис. 1). Водоохранилище занимает около 640 км² в восточной части географической Провинции Долин и Хребтов (Basin and Range Province). Общий объем его составляет около 35 км³. Его длина составляет при максимальном заполнении около 180 км. Водоохранилище названо в честь Элвуда Мида (Elwood Mead) – одного из руководителей проекта.

Всё водохранилище географически разделяется на впадины Боулдер (Boulder), Верд-

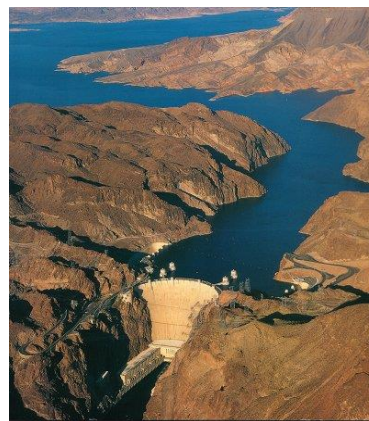


Рис. 1. Общий вид плотины Гувер Дам в каньоне реки Колорадо (фото Управления мелиорации, Bureau of Reclamation)

жин (Virgin), Темпл (Temple) и Грэгг (Gregg), разделенных узкими каньонами, и имеет несколько заливов, образованных на месте затопленных долин притоков, наибольшим из которых является Овертон Арм (Overton Arm).

Водоохранилище в основном пополняется водой постоянных притоков – Колорадо, Верджин, Мадди Крик (Muddy Creek) и Лас Вегас Вош (Las Vegas Wash). Другие притоки боль-

шую часть времени остаются сухими и обеспечивают приток только во время коротких периодов ливневых осадков (Twichell et al., 2003; Smith et al., 1960).



Рис. 2. Космический снимок территории водохранилища Озеро Мид, Lake Mead (фото NASA изменено)

Главными целями строительства плотины Гувер Дам являются (Thomas, 1954):

- регулирование водостока и контроль за паводками;
- снабжение водой ирригационной системы и населения;
- выработка электроэнергии.

Для поддержания оптимального рабочего режима водохранилища, Геологической службой США для Бюро мелиорации периодически проводились исследования процессов накопления донных осадков, сокращающих объем водохранилища, потерь воды за счет испарения, инфильтрации, а также распределения минерализации и загрязнения вод. Бюро мелиорации, отвечающее за строительство и эксплуатацию водохранилища, обязано периодически проводить исследования процессов, связанных с его образованием. Несколько широкомасштабных проектов были инициированы в разные годы для сбора данных до и после его заполнения (Ferrari, 2008). В разные годы несколькими организациями проводились исследования, касающиеся узких специализирован-

ных тем биологии, экологии, рекреации и т.д. Результаты мониторинговых исследований динамики процессов, сопутствующих заполнению водохранилища Лэйк Мид, используются повсеместно для прогноза негативных явлений и их предотвращения при эксплуатации гидротехнических сооружений подобного типа.

Методика исследования процессов, сопровождающих заполнение водохранилища

Ransome F. I., Berkey C. P., Mead W. J., и Longwell C. R. провели детальные исследования места расположения плотины и водохранилища до и во время строительства (Longwell, 1936). Эти геологические и геодезические данные были использованы как базовые при изучении динамики процессов во время и после заполнения водохранилища.

При проектировании плотины Гувер Дам были проведены оценочные расчеты предельно-допустимого объема аккумуляции донных осадков, который определяет время жизни

(эксплуатации) водохранилища. Эта оценка базировалась на величине его емкости при заполнении осадками до уровня гребня водосброса (Smith, 1960). Позже результаты расчетов были скорректированы в соответствии с новыми данными, полученными при исследованиях, проведенных Геологической службой США при участии исследовательского института озер Мид и Мохаве университета Невады, Лас Вегас (Lake Mead/ Mohave Research Institute, University of Nevada, Las Vegas) в 1999-2001 гг. В течение 2002 г. исследователи из университета Невады провели дополнительные работы по заверке полученных ранее геофизических данных и распределению загрязняющих веществ в донных осадках.

Работы 1999 г. были сосредоточены на акватории впадины Боулдер, северо-западная часть залива Лас Вегас была исследована в 2000 г., а в 2001 г. съемка была проведена в восточной части водохранилища. Результаты работ были изложены в нескольких отчетах (Twichell et al., 1999; 2001; 2003).

Дно водохранилища было исследовано с использованием акустического локатора бокового обзора и высокоразрешающего сейсмопрофилирования. С помощью сейсмических данных были получены детальные разрезы придонных отложений. Гидролокатор бокового обзора обеспечил получение цифровых снимков элементов поверхности дна и информации о типе самых верхних слоев осадков и их структуре. Используемая навигационная система обеспечивала точность позиционирования +/- 5 метров. Для заверки получаемых геофизических данных производился отбор керн донных отложений (Twichell et al., 2003).

Процессы деформации (оседания) поверхности и наведенной, вызванной заполнением водохранилища сейсмичности являются вопросами особой важности, так как они могут привести к нарушению как тела плотины, так и массива пород её основания. Первые геодезические измерения на территории, включающей Озеро Мид, были проведены с целью определения деформации земной поверхности при его заполнении в 1935 г. Несколько повторных наблюдений проведено также в 1941,

1950 и 1963 гг. Величина оседаний была определена относительно уровня поверхности, полученного в 1935 г. в начале заполнения водохранилища (Smith, 1960).

Сейсмические наблюдения на территории водохранилища начали проводиться только после первого землетрясения, зарегистрированного при его заполнении в 1936 г. До его образования сейсмическая активность территории инструментально не изучалась, поэтому все сейсмические события, записанные сейсмографами, установленными во время заполнения, условно считаются наведенными. Три сейсмических станции были установлены в плотине и около неё в апреле 1937 г., а отдельный Вуд-Андерсон сейсмограф был установлен в Боулдер-Сити в 1938 г. Две дополнительные сейсмические станции были установлены в 1940 г. в Овертоне (Невада) и в Пирс Ферри (Аризона) в верхней части водохранилища, где отмечается наибольшая интенсивность накопления осадков (Carder, 1945). На рис. 3 показан сейсмограф, установленный в вентиляционном тоннеле плотины Гувер Дам (2005 год).



Рис. 3. Сейсмический регистратор в вентиляционном тоннеле плотины (фото автора)

Результаты исследований

Осадконакопление. Отложения водохранилища Лэйк Мид сформировали две дельты: одна из них протянулась в русле реки Колорадо от Бридж Каньона до плотины, а другая, меньшего размера, вдоль затопленного русла реки Верджин в заливе Овертон (Thomas, 1954). Современный рельеф поверхности от-

ложений вдоль затопленной долины реки Колорадо показан на рис. 4.

Наклон поверхности дна вдоль осевой части затопленной долины реки Колорадо уменьшается по направлению к плотине за исключением участка во впадине Боулдер, где отмечается поднятие дна в месте пересечения подводного оползня, произошедшего сразу после заполнения водохранилища (Smith, 1960; Twichell et al., 2003).

Дельты водохранилища сложены практически полностью песком, илом и глиной. Гравий встречается только в восточной его части. В связи с резким падением скорости потока при впадении в водоем наиболее крупнозернистый материал аккумулируется в головной части дельты, а самый мелкий переносится на большие расстояния,

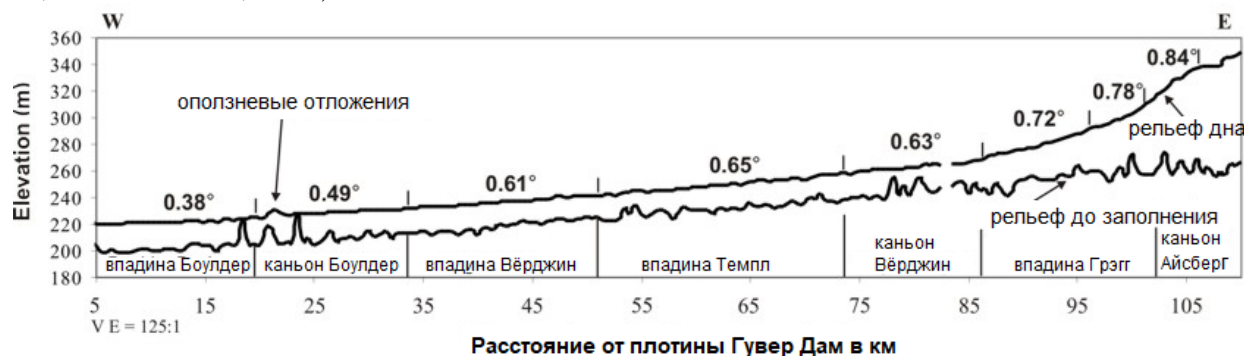


Рис. 4. Разрез донных отложений от каньона Айсберг до впадины Боулдер (изменено из Twichell et al., 2003)

что приводит к закономерному изменению типа отложений и их физических свойств вдоль дельты (Thomas, 1954). Перераспределение отложений в водохранилище является результатом действия плотностных или турбидитных течений. Плотностные течения могут возникать вследствие различий в температуре, минерализации или содержании взвешенного материала (турбидиты) во впадающем потоке и воде водохранилища (Gould, 1951; Smith, 1960). Несмотря на то что плотностные (гравитационные) течения наблюдались со времен заполнения резервуара Озера Мид, настоящих исследований этих процессов не проводилось. Самое детальное геофизическое картирование его донных отложений было предпринято Геологической службой Соединенных Штатов совместно с Исследовательским институтом Озера Мид и Мохав университета Невады, Лас Вегас в 1999–2002 гг.

Они исследовали распределение и мощность донных отложений с использованием гидролокатора бокового обзора (sidescan sonar) и высокоразрешающее сейморазведочное профилирование почти на всей акватории во-

дохранилища за исключением участков малых (менее 5–10 м) глубин (Twichell et al., 1999; 2001; 2002; 2003; 2005). Сейсмопрофилирование использовалось для определения мощности слоя накопленных осадков. Присутствие газа в донных отложениях в некоторых случаях препятствовало получению кондиционных данных. Общая мощность отложений определялась как разница между настоящей высотой отметкой поверхности дна и результатами геодезических измерений до заполнения водохранилища (Smith, 1960).

На рис. 5 представлены данные секущих затопленную долину реки Колорадо сейсмических профилей, которые демонстрируют распределение осадков в различных частях водохранилища. На профиле А отображается только самая верхняя часть разреза придонных отложений так как высокое содержание в них газа приводит к существенному затуханию сейсмического сигнала. Хорошее качество данных на профилях В, С и D позволяет надежно картировать границу первоначальной поверхности ложа водохранилища (Twichell et al., 2003).

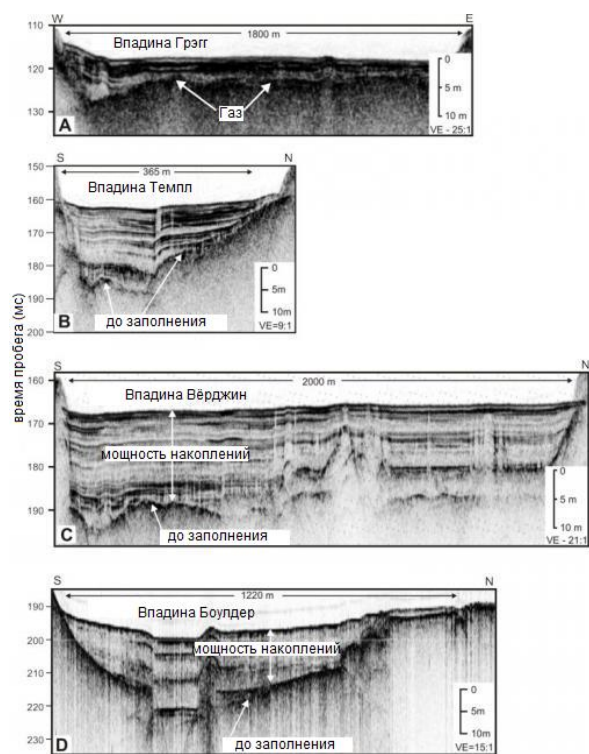


Рис. 5. Сейсмические профили, секущие водохранилище (изменено из Twichell et al, 2003)

Исследования показали, что отложения концентрируются в наиболее глубоких частях долин реки Колорадо и крупных притоков, формируя непрерывный слой на протяжении всей долины Колорадо до плотины Гувер Дам. Они достигают максимальной мощности в головной части водохранилища, где их мощность достигает 70 м. В центральной части их мощность составляет 15–25 м, постепенно увеличиваясь до 30 м около плотины Гувер Дам. Мощность отложений в заливе Овертон не превышает 1–4 м.

Характер распределения осадков в Озере Мид свидетельствует о том, что река Колорадо является основным источником материала, поступающего в водохранилище. При этом геометрия осадочного слоя позволяет предполагать, что он сформирован в результате плотностных (гравитационных) течений по всей длине водохранилища.

Отражения высокой амплитуды в толще накопленных осадков трех западных впадин, которые предположительно относятся к песчаным отложениям, сейчас покрыты слоем

илов и только в головной части водохранилища вблизи дельты дно сложено песками, которые осложнены каналами. Возможно строительство плотины Глен Каньон Дам (Glen Canyon Dam) в 1965 г. выше Озера Мид стало причиной изменения материала осадков, приносимых в водохранилище (Twichell et al., 2002).

Гидролокатор бокового обзора (ГЛБО, sidescan-sonar) позволил получить детальную информацию о геологии поверхностных слоев дна. Гидролокатор бокового обзора основан на регистрации акустических волн, рассеянных неровностями на поверхности дна, поэтому на изображении данных съемки гравий, крупнообломочный материал, выходы скальных пород изображаются светлым цветом, а мелкозернистые отложения – темным. На представленных рисунках показаны типичные изображения дна водохранилища.

На рис. 6 показано изображение части каньона Айсберг, где можно выделить участки сильного рассеяния сигнала, которые относятся к стенкам каньона, среднезернистый материал дна и небольшие впадины (rockmarks), являющиеся местами выхода газов.

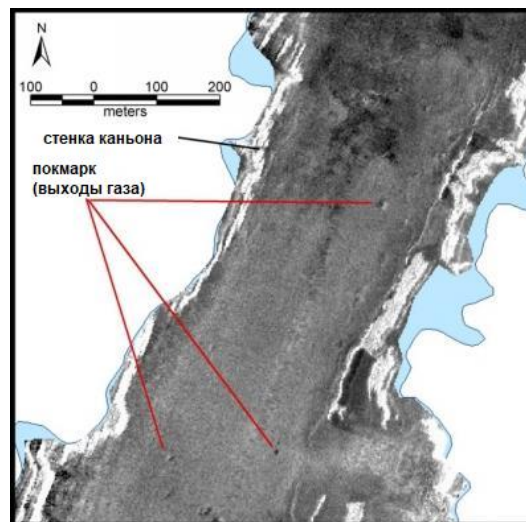


Рис. 6. Изображение дна каньона Айсберг. Средней силы рассеяние сигнала свидетельствует о преимущественно среднезернистом материале дна. Одной из особенностей является наличие структур, связанных с выходом газов (изменено из Twichell et al., 2003)

Рис. 7 показывает изображение дна впадины Боулдер. Для донных отложений характерно низкое рассеяние (мелкозернистый материал). Они граничат на севере с кайнозойскими осадочными породами и аллювиальными породами конуса выноса на юге. Две протяженные параллельные полосы повышенного рассеяния в центральной части соответствуют краям русла затопленной реки Колорадо. В данном месте мощность отложений составляет около 15 м и сохранение границ русла возможно произошло из-за неравномерного уплотнения осадков после накопления.

Для интерпретации полученных данных были отобраны образцы пород дна водохранилища. Анализ образцов также помог выяснить характер процессов транспортировки и накопления отложений.

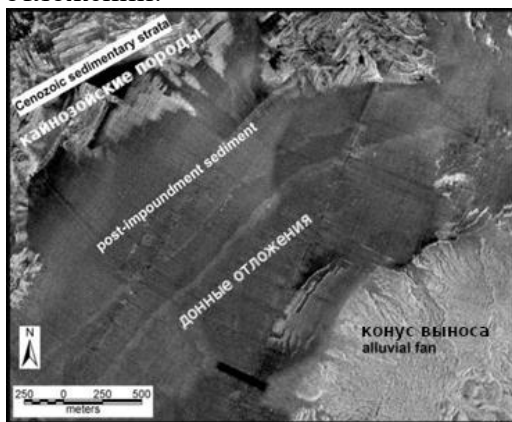


Рис. 7. Изображение дна впадины Боулдер. В центральной части выделяется погребенное русло реки Колорадо (изменено из Twichell et al., 2003)

Исследования подтвердили, что накопление осадков в Озере Мид происходило в основном за счет плотностных (гравитационных) потоков, которые распространялись по всей длине водохранилища. Аккумуляция осадков таким путем способствовала формированию практически плоской поверхности дна, аналогично формированию турбидитных долин, но в меньшем масштабе (Twichell et al., 2001).

Деформация поверхности. Заполнение водохранилища Озеро Мид, начавшееся в феврале 1935 г., привело к постепенной деформации земной поверхности как под самим резервуаром, так и на окружающей террито-

рии. Геодезическая съемка тех лет показала, что зона проседания имеет вид впадины с центром вблизи каньона Боулдер (рис. 8). Местоположение максимальных значений проседания скорее всего связано с тем, что около 60% объема воды в водохранилище сконцентрировано в широких впадинах Боулдер и Верджин (Thomas, 1954; Smith, 1960).

Несколько повторных геодезических наблюдений были проведены в разное время, чтобы определить изменение деформации земной поверхности относительно данных 1935 г. Рассматривая величину проседаний в центральной части водохранилища по отношению к данным 1935 г. (120 мм в 1941 г., 218 мм в 1950 г., 200 мм в 1963 г.), можно заметить, что деформации затухают со временем и достигли релаксации тогда, когда уровень заполнения достиг современного уровня, т.е. после 1950 г. (Kaufman and Amelung, 1998). Однако небольшие вариации отметок рельефа наблюдаются уже после наступления релаксации в связи с сезонными и другими изменениями уровня воды в водохранилище.

В период 1992–2001 гг. для изучения малых деформаций в районе Озера Мид была использована спутниковая интерферометрия SAR (Cavalié et al., 2004). В результате анализа полученных данных было установлено, что существует корреляция между изменениями уровня воды в резервуаре и величиной сдвига поверхности. Так проседания поверхности в более чем 1,5 см между 1996 и 1998 гг. сменилось поднятием после 2000 г. в связи с падением уровня воды в водохранилище. В то же время отмечались некоррелируемые движения в северных прилегающих районах. В период проседания на данных территориях наблюдалось поднятие поверхности до 1,2 см. Это может свидетельствовать о блоковом характере процессов деформации.

Вызванная сейсмичность. В большинстве случаев наведенная сейсмичность проявляется в результате заполнения, значительных колебаний уровня воды, заполнения выше уровня, достигнутого до этого времени или других процессов, вызывающих деформации поверхности Земли на сопредельной территории.

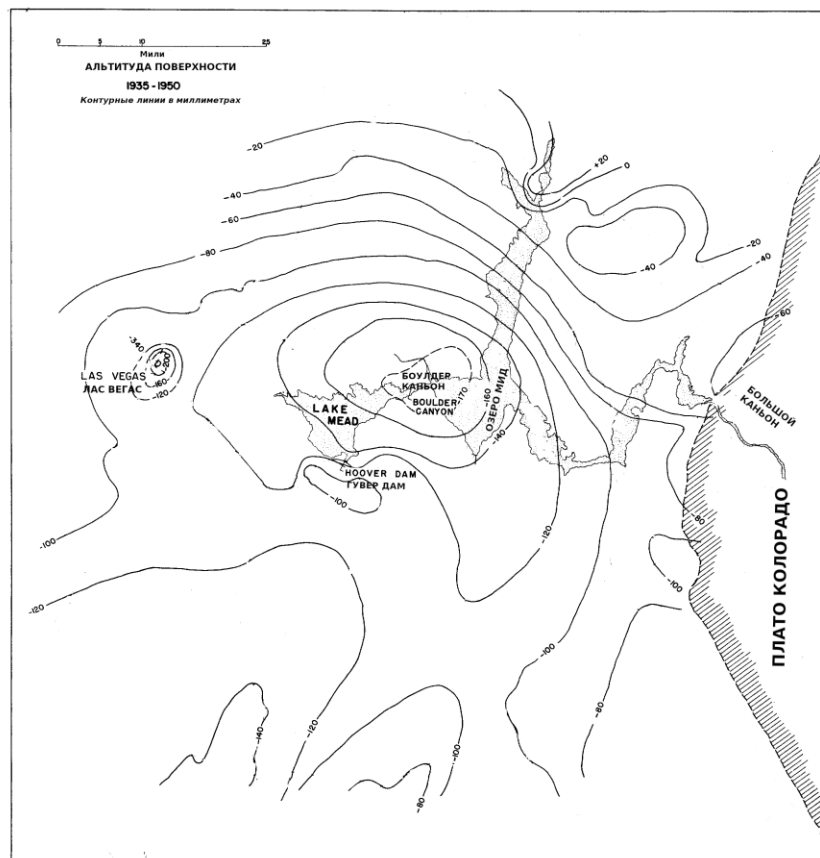


Рис. 8. Карта деформации земной поверхности при заполнении водохранилища Озеро Мид по данным геодезических наблюдений 1935–1954 гг. (изменено из Thomas, 1954)

Сейсмичность в этом случае рассматривается как отклик на изменение коэффициента порозластичности пород. Начальный период заполнения обычно характеризуется повышением сейсмической активности, появлением сильных толчков, широким проявлением активности на периферии территории водохранилища и её перераспределением на соседние участки земной поверхности. Как правило, пространственное распределение сейсмичности связано с тектоническими элементами строения пород ложа резервуара. Со временем наблюдается спад сейсмической активности, зависящий от частоты и амплитуды изменения уровня воды, размеров водохранилища и гидромеханических свойств подстилающих пород (Talwani, 1997).

После завершения строительства плотины Гувер Дам, вдоль долины реки Колорадо образовалось водохранилище глубиной около 150 м. В скором времени после заполнения

водохранилища стали фиксироваться небольшие землетрясения, которые предположительно были результатом комбинации факторов (Roeloffs, 1988). Основной из факторов это дополнительный вес воды, плотины и донных отложений, вызвавший дополнительные сдвиговые напряжения в земной коре, особенно в зонах разломов; другой фактор связан с проникновением воды из водохранилища в разломы земной коры и, соответственно, уменьшением сопротивления пород к сдвигу (Wang, 2000). Как утверждает Roeloffs (1988), максимальные напряжения в системе вертикальных сдвиговых сбросов должны возникать прямо под резервуаром на глубине, соизмеримой с его шириной. Впервые интерес к землетрясениям, связанным с образованием водохранилищ, появился после строительства плотины Гувер Дам (Mead and Carder, 1941; Carder, 1945).

Как утверждает Т. С. Mead, в течение 15 лет, предшествовавших строительству водохранилища, на близлежащей территории не было засвидетельствовано ни одного события, а первое землетрясение было зарегистрировано в 1936 г. после начала заполнения.

После установки сети сейсмостанций, в течение 10 лет было зарегистрировано несколько тысяч событий (рис. 9). Основное число событий регистрируется на участках с наибольшей глубиной водохранилища и мощности накопленных осадков вблизи плотины. Здесь

нет прямой корреляции между максимальными проседаниями земной поверхности и сейсмической активностью. Это свидетельствует о том, что её распределение в большой степени зависит от тектоники региона. В течение полутора лет, в 1972–1973 гг., были проведены наблюдения микросейсмичности с помощью телеметрической сети из девяти сейсмических станций, установленных вокруг впадины Боулдер (Rogers and Lee., 1976). Анализ данных показал, что эпицентры событий концентрируются на восточной окраине водохранилища,



Рис. 9. Изолинии проседания земной поверхности и эпицентры землетрясений магнитудой 3,6–5,0 за период 1937–1947 гг. (изменено из Carder, 1948)

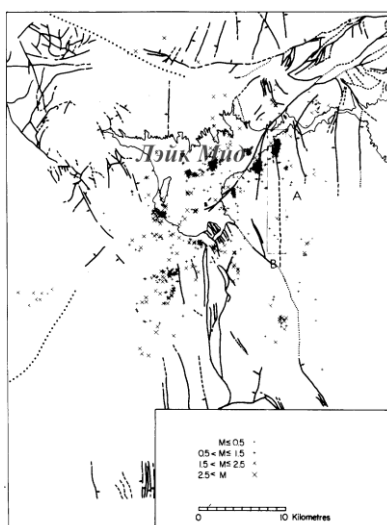


Рис. 10. Эпицентры событий микросейсмических наблюдений по результатам эксперимента 1972–1973 гг. (изменено из Rogers and Lee., 1976)

где, по геологическим данным, проходит региональный разлом (рис. 10).

Это подтверждает выводы о тесной связи распределения наведенной сейсмичности с геологическими структурами территории водохранилища и окружения. Другой эксперимент по регистрации микросейсмической активности был проведен в течение 2 месяцев в 1988 г., который подтвердил, что эпицентры большинства зарегистрированных событий также совпадают с положением известных региональных разломов.

Все наблюдатели считают, что землетрясения в районе водохранилища Лэйк Мид обусловлены, в первую очередь, дополнительной нагрузкой воды и её инфильтрации в зоны разломов. Кроме того, зафиксированы периоды быстрого наполнения резервуара (1957–1958, 1962 гг.) и спада уровня воды, которые коррелируются с периодами активизации сейсмической активности и регистрации крупных событий. Однако после строительства плотины Лэйк Пауэлл, зарегулировавшей сток ниже по течению реки Колорадо, количество землетрясений на территории водохранилища Мид существенно уменьшилось.

В результате анализа данных о землетрясениях с момента начала наблюдений до 2002 г. были установлены следующие этапы изменения динамики сейсмического режима территории водохранилища Лэйк Мид (O'Connell, 2002):

1. 1935–1936. Начало заполнения. Небольшие землетрясения. Начальный этап деформации поверхности.
2. 1936–1938. Продолжение заполнения. Нарастание сейсмической активности. Признаки распространения напряжений вдоль разломов.
3. 1939. Полное заполнение. Регистрация наиболее крупных землетрясений. Расширение зон деформации разломных зон.
4. 1941–1945. Уровень, близкий к уровню заполнения. Землетрясения коррелируются с годовыми максимумами уровня. Воздействие нагрузки распространяется на весь массив земной коры в районе водохранилища, но

основные изменения наблюдаются в зоне разломов.

5. 1946–1952. Уровень, близкий к уровню заполнения. Землетрясения коррелируются с годовыми минимумами уровня. Деформация всего участка земной коры завершена, доминирует разгрузка резервуара.

6. 1953–1958. Низкий уровень воды в водохранилище. Быстрое заполнение в 1957 и 1958 гг. Сильное землетрясение в 1958 г. после достижения максимума уровня. Доминирование деформации в зоне разломов после быстрого повышения уровня воды.

7. 1959–1963. Быстрое заполнение в 1962 г. Сильное землетрясение в 1963 г. после пикового заполнения. Доминирование деформации в зоне разломов после быстрого повышения уровня воды.

8. 1963–1965. Быстрое падение уровня. Землетрясения $M = 4$ во время быстрой разгрузки. Доминирование деформации в зоне разломов после быстрого спада уровня воды.

9. С 1966 до настоящего времени. Небольшие годовые изменения. Землетрясения только с магнитудой менее 4. Работают оба механизма деформации.

Загрязнение среды. Лэйк Мид является одним из самых интенсивно используемых водоемов на западе Соединенных Штатов, используемых для водного отдыха, питьевого, промышленного и ирригационного водоснабжения для почти 20 миллионов человек. Поэтому распределение загрязняющих веществ и растворимых солей в воде и осадках водохранилища является одной из важных проблем местных властей.

Концентрация растворенных твердых веществ в водах водохранилища зависит главным образом от характеристик втекающих в резервуар потоков, количества растворенных гипса и ангидрита, слагающих дно и берега, и интенсивности процессов испарения. Несмотря на повышение содержания твердых веществ из-за процессов испарения и растворения, наблюдается стабилизация химического состава вод и концентрация растворимых солей в вытекающей воде меньше, чем в речной воде (Thomas, 1954).

В результате последних исследований установлено, что основным источником загрязнения являются воды притока Лас-Вегас Вош, который дренирует территорию городской агломерации Лас-Вегас. Данные исследований показывают, что осадки этого притока переносятся в воды водохранилища на расстояние около 8 км (Twichell et al., 1999).

Химические анализы отобранных в водохранилище в 2002 г. проб были проведены в университете Невады с целью определения присутствия и распределения загрязняющих веществ в донных осадках. Среди установленных загрязняющих веществ выделяются различные пестициды, промышленные продукты, фармацевтические и продукты личного пользования. Разнообразные загрязнители были обнаружены в воде, осадках и тканях рыб, отобранных в притоке Лас-Вегас Вош и заливе (Tuttle and Osark, 2002).

Чтобы уменьшить эффект загрязнения территории, власти города Лас-Вегас и окружающих поселений проводят ряд мероприятий по мониторингу ситуации в различных частях водохранилища. Установлено 5 автоматиче-

ских станций постоянного контроля за параметрами среды и концентрацией загрязняющих веществ в воде и осадках водохранилища. За время наблюдений установлено, что в последнее время регистрируется повышение концентрации вредных веществ в связи с ростом населения территории.

Выводы

Создание большого водохранилища повлекло за собой появление большого количества проблем, связанных с деформацией земной поверхности, вызванной сейсмичности, опасности разрушения плотины, загрязнения воды, изменений климата и биосферы. Своевременные мероприятия по смягчению негативных последствий требуют проведения всестороннего мониторинга происходящих при строительстве и эксплуатации водохранилищ процессов. Богатый опыт проведения исследований на водохранилище Лэйк Мид был использован при строительстве самых крупных плотин мира.

Monitoring Studies of Geological Processes Occurred at the Lake Mead Area since Impoundment in 1935 until Beginning of XXI Century

O. N. Kovin

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: on_kovin@psu.ru

Reservoirs, constructed for flood control, irrigation purposes, electric power and drinking water supply, can trigger significant changes in the geological processes on their territory and surroundings, as well as in climate, biosphere, and environ. In the article presents the results of comprehensive monitoring studies of Lake Mead reservoir on the Colorado River, Nevada, conducted on the request of Bureau of Reclamation of the U.S. Department of the Interior. Lake Mead was created after construction of the Hoover Dam that is one of the first dams on the Colorado River. Experts from geology, geophysics, oceanography, hydrology, and ecology were involved in this study. In result of the comprehensive research, headed by USGS, data on the dynamics of bottom sediments were obtained and analyzed; geodetic measurements of subsidence and earthquakes registration were performed; the main contamination sources were revealed. Furthermore, analysis of collected data allowed estimating the reservoir life up to 400 years.

Key words: *reservoir; dam; bottom sediments; induced seismicity; geophysical investigation of bottom sedimentation; water contamination.*

References

Carder D.S. 1945. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940–1945, and the influence of reservoir loading on earthquake activity. Bulletin of the Seismological Society of America. 35: 175–192. doi: 10.1785/BSSA0350040175

Carder D.S., Small J.B. 1948. Level divergences, seismic activity, and reservoir loading in the Lake Mead area, Nevada and Arizona. AGU Transactions. 29: 767–771. doi: 10.1029/TR029i006p00767

- Cavalié O., Doin M., Lasserre C., Briole P.* 2007. Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing the lithosphere rheological structure. *J. Geophys. Res.* 112(B03403). doi: 10.1029/2006JB004344.
- Ferrari R.L.* 2008. 2001 Lake Mead Sedimentation Survey. U.S. Bureau of Reclamation. (URL: http://www.usbr.gov/pmts/sediment/projects/ReservoirSurveys/Reports/2001_Lake_Mead_Sedimentation_Survey.pdf последнее посещение 6.11.2021)
- Gould H.R.* 1951. Some quantitative aspects of Lake Mead turbidity currents. *In: Turbidity currents and the transportation of coarse sediments to deep water—a symposium. Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub. 2*, pp. 34–52.
- Kaufmann G., Amelung F.* 2000. Reservoir-induced deformation and continental rheology in vicinity of Lake Mead, Nevada. *Journal of geophysical research.* 105(B7):16341-16358. doi: 10.1029/2000JB900079
- Longwell C.R.* 1936. Geology of the Boulder Reservoir floor. *Bull. of the Geol. Soc. of America*, 47:1393–1476.
- Mead T.C., Carder D.S.* 1941. Seismic investigations in the Boulder Dam area in 1940. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 31 (4):321–324. doi: 10.1785/BSSA0310040321
- O'Connell D.H.R.* 2002. Earthquakes, Faults, and Reservoirs: Seismicity Near Hoover Dam. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado
- Roeloffs E.A.* 1988. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure Appl. Geophys.* 126:177–209. doi: 10.1007/BF00878996
- Rogers A.M., Lee W.H.K.* 1976. Seismic Study of Earthquakes in the Lake Mead, Nevada-Arizona Region. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 66: 1657. doi: 10.1785/bssa0660051657
- Rogers J.D.* 2010. Hoover Dam: Scientific Studies, Name Controversy, Tourist Attraction, and Contributions to Engineering. *In: Hoover Dam 75th Anniversary History Symposium 2010, Las Vegas*, pp. 216–248.
- Smith W.O., Vetter C.P., Cummings G.B. et al.* 1960. Comprehensive survey of sedimentation in Lake Mead, 1948–1949: US Geological Survey Professional Paper 295, p. 254.
- Talwani P.* 1997. On the Nature of Reservoir-induced Seismicity. *Pure appl. geoph.* 150: 473–492. doi: 10.1007/978-3-0348-8814-1_8
- Thomas H.E.* 1954. First fourteen years of Lake Mead. USGS Survey Circular 346, p. 27. doi: 10.3133/cir346
- Tuttle P.L., Orsak E.L.* 2002. Las Vegas Wash water quality and implications to fish and wildlife. USFWS. Nevada FWO, p. 57.
- Twichell D.C., Cross V.A., Rudin M.J., Parolski K.F., Rendigs R.R.* 1999. Surficial Geology and Distribution of Post-Impoundment Sediment in Las Vegas Bay, Lake Mead, USGS Open-File Report 01-070. (URL: <http://pubs.usgs.gov/of/of01-070> последнее посещение 12.10.2021).
- Twichell D.C., Cross V.A., Rudin M.J., Parolski K.F.* 2001. Surficial Geology and Distribution of Post-Impoundment Sediment of the Western Part of Lake Mead Based on a Sidescan Sonar and High-Resolution Seismic-Reflection Survey. USGS Open-File Report 99-581. (URL: <https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-581> последнее посещение 14.09.2021).
- Twichell D.C., Cross V.A., Rudin M.* 2002. Mapping turbidites in Lake Mead from source to sink [abs.]: American Association of Petroleum Geologists, Annual Meeting, Abstracts with Programs, Houston, Tex., March 2002, v. 11, p. A179–180.
- Twichell D.C., Cross V.A., Belew S.D.* 2003. Mapping the floor of Lake Mead (Nevada and Arizona): Preliminary discussion and GIS data release, USGS Open-File Report 03-320. (URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-320> последнее посещение 09.10.2021).
- Twichell D.C., Cross V.A., Hanson A.D. et al.* 2005. Seismic architecture and lithofacies of turbidites in Lake Mead (Arizona and Nevada, U.S.A.), an analogue for topographically complex basins. *Journal of Sedimentary Research.* 75(1):134–148. doi: 10.2110/JSR.2005.011
- Wang H.F.* 2000. Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology. Princeton University Press.