

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМ СТРОИТЕЛЬСТВОМ РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ОБЗОР

Малик Л.К., кандидат географ. наук

(Институт географии Российской Академии наук)

Конец XX и начало XXI века характеризуется в истории развития человеческого общества опасным ростом количества и масштабов различных аварий и катастроф, неблагоприятным проявлением стихийных природных процессов, увеличением риска повреждения экологически опасных сооружений, обострением политических кризисов и этно-социальных конфликтов. Все эти события провоцируют возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС), дестабилизируют экономику стран, приводят к постоянному увеличению пострадавших от различных бедствий людей и росту прямых и косвенных ущербов.

По данным МЧС, за последние 10 лет конца XX – начала XXI века в Российской Федерации от опасных природных и техногенных процессов погибло более 3000 человек и пострадало около 200 тысяч.

Наиболее опасен риск аварий и катастроф на крупных экологически уязвимых объектах, к которым относятся многие водохозяйственные сооружения (плотины и водохранилища, дамбы, перемычки, туннели, каналы, берегозащитные и ограждающие сооружения, в том числе сооружения золошлаковых отходов, пруды-накопители и др.). Все они в различных сочетаниях входят в состав электростанций.

17 августа 2009 г. произошла катастрофическая авария на Саяно-Шушенской ГЭС, повлекшая за собой гибель людей, значительные повреждения технологического оборудования и экономические потери. В причинах чрезвычайной ситуации предстоит разобраться специалистам.

Автор статьи считает целесообразным рассмотреть различные причины ранее возникавших ЧС на гидротехнических объектах, приводивших нередко к их повреждениям и даже разрушению.

В настоящей статье основное внимание уделено подпорным гидротехническим сооружениям – плотинам ГЭС и водохранилищам, построенным в различных странах, в разных по природным условиям регионах и в разное время. Многие из них эксплуатируются десятки, сотни и даже тысячи лет и зарекомендовали себя в целом устойчивыми сооружениями. Например, в Англии 50% плотин построено более 80 лет тому назад, в Испании 10 плотин функционируют более 1600 лет. В верховьях Рейна до сих пор эксплуатируется старейшая в Европе ГЭС Рейнфельден, построенная в 1880 г. Китай в течение около 4 тысяч лет имеет опыт конструирования и строительства плотин и

использования зарегулированных водных ресурсов. Плотина Дунангдан, созданная 2000 лет назад, регулировала паводки реки Манджианг и позволила использовать её воды для орошения. Построенная на р. Хуанхэ ещё до нашей эры плотина Шан Шуао успешно функционирует и в наше время [1].

Но большинство плотин построено современными методами, на основе современных проектов. Однако мировая статистика и события последних лет свидетельствуют о возможности повреждений и разрушений гидроузлов. Более того, вероятность аварий на гидросооружениях имеет тенденцию роста, особенно после их эксплуатации более 30-40 лет.

По данным Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) в настоящее время в мире построено более 45000 больших плотин, более 60% из них являются грунтовыми. Наибольшее число подобных плотин в Нидерландах (100%) и в Англии (67%), наименьшее — в Норвегии (1%) и в Австрии (12%). Приблизительно на 40% плотин различных типов были зафиксированы аварии, а также прорывы напорного фронта. [2].

Наиболее надёжными оказались бетонные плотины, примерно в 3 раза менее надёжны каменно-земляные, аварии на которых в большинстве случаев произошли вследствие перелива воды через их гребень.

Катастрофические аварии за всю историю эксплуатации подпорных сооружений наблюдались во многих развитых и развивающихся странах.

В историю гидротехники вошли колоссальные катастрофы, вызванные прорывом дамб на реках Хуанхэ и Янцзы, Миссисипи и Миссури, на Дунае, в Голландии. Крупные катастрофические аварии плотин произошли в США, Франции, Италии, Индии, Бразилии, Южной Корее и других странах. Наиболее трагические последствия от повреждения плотин ГЭС и водохранилищ имели место в США (плотины Биг Томсон, Каньон Лейк, Сен Френсис, Титон). Причиненный ущерб от аварии на плотине Титон в бассейне р. Колорадо превысил 1 млрд. долл. [3].

Масштаб национальных бедствий приобрели аварии плотин в Италии — Грено и Вайонт. В последнем случае из-за подземных толчков в водохранилище на р. Пьяве обрушился оползень, вызвавший перехлест образовавшейся волны через плотину (общее количество пострадавших составило 30000 человек).

Во Франции в 1959 г. из-за горных просадок под фундаментом была разрушена плотина Мальпасе на р. Рейран, погиб 421 человек, уничтожена со всем персоналом военно-воздушная база, ущерб оценен в 68 млн. долл.

Аварии с большими ущербами были на плотинах в Индии (Мачху-II), в Бразилии (Орос), в Южной Корее (Хаюкири) и в других странах. Перечисленные 10 аварий вызвали гибель 8000 чел. [4].

Наиболее опасные по своим последствиям ЧС возникают при прохождении через гидротехнические сооружения сверхрасчётных расходов воды и заниженных размерах водосбросов. Об этом свидетельствуют материалы Международной комиссии по большим плотинам, в соответствии с которыми ежегодно в мире на гидроузлах происходит около 3 тысяч аварий. Из них значительное число повреждений наблюдается в период прохождения катастрофических сверхвысоких половодий и паводков, что связано с недостатками проектно-технических решений при пропуске экстремальных расходов, а также вследствие плохой работы эксплуатационных служб. В результате в период прохождения крупных паводков не удаётся своевременно открыть затворы и сброс воды осуществляется через гребень плотины, что приводит к разрушению конструкций.

В мировой практике при проектировании плотин расчёт ведётся на очень редкие события. Но в истории плотиностроения есть немало примеров разрушения гидроузлов под влиянием паводков крайне редкой обеспеченности.

В публикации С.Ф. Бобкова и др. [5] приводятся примеры таких паводков. На плотине Зербино в Италии высотой 16,5 м (построенной в 1924 г.) максимальный расход водосброса составлял 700 м³/с, а наибольший измеренный расход – не более 400 м³/с. В августе 1935 г. был зафиксирован приток воды к водохранилищу в количестве 2200 м³/с (повторяемость – 1 раз в 200000 лет), слой переливающейся через гребень плотины воды достигал 2,2 м. На гидроузле Ринкон-дель-Боннет (Уругвай) в 1959 г. был отмечен паводок повторяемостью 1 раз в 5000 лет.

В 1889 г. была размыта земляная плотина Соу-Фокс в США в результате перелива через гребень паводочной волны с максимальным расходом в 2 раза превышающим пропускную способность водосброса, погибло 2269 человек. В 1984 г. была прорвана плотина Мачху II в Индии, максимальный расход волны прорыва достигал 14 тыс. м³/с при расчётном 6180 м³/с, было смыто 12 тыс. домов, погибло 2000 человек [6].

Переливы воды из водохранилища через гребень плотины могут быть связаны и с чисто техническими причинами – отказом затворов водосбросных сооружений вследствие редкого использования, отсутствия профилактики, периодической проверки их эксплуатационной надёжности, а также из-за прекращения подачи электроэнергии.

Если 35% случаев разрушения грунтовых плотин вызвано переливом воды через гребень, то 1/3 из них в свою очередь повреждалась из-за отказов в работе затворного оборудования. Подобные отказы приводили к аварийным ситуациям на целом ряде плотин. Так, из-за отсутствия подачи электроэнергии к механизмам управления затворами водосборов в 1958 году был разрушен участок плотины Кадда в Индии длиной 137 м при высоте переливающегося слоя воды в 45 м.

По этой же причине – неисправность электрооборудования и невозможность открыть все 18 пролётов для пропуска паводка (удалось открыть только три) были усугублены последствия аварии в 1979 г. на плотине Мачху II (также в Индии).

В России аналогичная авария произошла 7 августа 1994 г. на плотине Тирлянского водохранилища (высотой 9,9 м и объёмом 7 млн. м³) в бассейне р. Белой, когда после интенсивных дождей, вследствие изношенности механизмов и заваренных для прочности затворов, не смогли открыть все отверстия берегового водосброса (работало только одно из них), и вода из переполненного водохранилища хлынула через гребень земляной плотины. Плотина была разрушена в течение нескольких часов, семиметровая волна прорыва снесла пос. Тирлян, погибло 28 человек.

Неувязки в проекте гидромеханического оборудования и неготовность к работе водосброса вызвали разрушение ограждающей дамбы водохранилища Сургутской ГРЭС, т. к. в паводок не удалось полностью открыть затворы.

Перебои с электроснабжением явились причиной аварий и на грунтовых плотинах Тоус (Испания) в 1984 г. и Бельцы (Румыния) в 1991 г. В обоих случаях был нанесён большой ущерб расположенным ниже территориям, погибли люди.

В период паводка 1985 г. разрушилась плотина Ноппинкоски в Швеции высотой в 7,5 м из-за того, что для пропуска сбросных расходов был поднят лишь один из двух затворов. В 1986 г. была частично смыта плотина Лутуфалст (Норвегия) после заклинивания затворов.

Пропуск расчётных расходов может быть ограничен из-за неблагоприятного состояния водосбросов, разрушения их отдельных элементов и размывов в нижних бьефах. В некоторых случаях перелив через гребень плотин происходит при засорении водосбросных отверстий плавающим лесом, древесиной, всплывающими торфяными массивами и т.д. Так, в паводок июля 1997 г. в Квебеке произошёл перелив через несколько гравитационных плотин слоем воды до 2 м. Бетонные плотины устояли, но были прорваны земляные участки плотин и береговые примыкания. Ущерб составил 800 млн. канадских долларов, погибло 10 человек. Одной из причин аварии явилась забивка водосбросных отверстий плавающим мусором.

На территории России и стран СНГ эксплуатируется более 300 тыс. водохранилищ и несколько сотен накопителей стоков и промышленных отходов. Имеется около 60 крупных водохранилищ с объёмами более 1 км³. Топливо-энергетический комплекс располагает 350 гидротехническими сооружениями, среди них 100 ГЭС с наиболее крупными водохранилищами. Для судоходства используются более 700 водохранилищ, в сельском хозяйстве — более 200 гидротехнических сооружений. Функционируют для различных целей более двух десятков тысяч мелких водохранилищ и прудов.

Наибольшую опасность представляют, конечно, повреждения и разрушения больших плотин и водохранилищ, т.к. с увеличением высоты плотин и объемов водохранилищ повышается степень риска, которому подвергаются население, хозяйственные и природные объекты в нижних бьефах гидроузлов. Также велики, но менее изучены, опасность и ущерб для верхних бьефов, связанные с опорожнением водохранилищ.

В РФ повреждения и нестандартные аварийные ситуации на гидроузлах возникали неоднократно. Например, в бывшем СССР в марте 1971 г. была разрушена перемычка при строительстве гидроузла на р. Аракс. Известен также прорыв в Таджикистане в 1987 г. небольшого горного Саргазонского водохранилища объемом 2.7 млн. м³ и высотой плотины 23 м, вызвавший гибель 32 человек и большой материальный ущерб.

Чрезвычайно опасным было появление в 1985 г. трещины в бетоне напорной грани плотины Саяно-Шушенской ГЭС и сильной фильтрации, подавленной с помощью новейших технологических средств. За все годы эксплуатации этой ГЭС трижды происходили аварии, связанные с пропуском паводочных вод (в 1979, 1985 и 1988 гг.). В последнем случае водобойный колодец был сильно повреждён, и принято решение строить ещё один водосброс.

Аварийная ситуация на каменно-земляной плотине Колымской ГЭС в 1988 году была вызвана рядом причин, основная из них – мёрзлая каменная упорная призма, в которой происходила фильтрация воды, потребовавшая осуществления аварийно-восстановительных работ.

Суффозионные нарушения фильтрационной прочности контакта ядра плотины со скальным основанием явились причиной прорыва 2 июля 1992 года напорного фронта каменно-земляной плотины Курейской ГЭС. Для устранения аварии потребовалось создание противофильтрационной стены длиной 94 м.

Чрезвычайные ситуации возникали нередко в период строительства гидроузлов. Например, спровоцированный землетрясением в середине 1970 года оползень при строительстве Чиркейской ГЭС, крупнейшей на Северном Кавказе, перекрыл русло р. Сулак. Разрыв завала водами реки вызвал образование волны прорыва, превысившей расход воды однопроцентной обеспеченности, но перемычка не была разрушена.

Нельзя не упомянуть также об опасности повреждения гидротехнических сооружений в связи с военными действиями в зонах этносоциальных конфликтов и возможными террористическими актами (например, повреждение турбины Дубоссарской ГЭС при артобстреле во время вооружённого конфликта в Приднестровье и опасности затопления многих населённых пунктов).

Можно привести ещё ряд примеров, иллюстрирующих чрезвычайные ситуации при создании плотин в РФ и других странах. Многие из них связаны с недостатками прогноза возможных последствий создания ГЭС в различных зонах, но немаловажным фактором являются, очевидно, и недостаточные наблюдения за состоянием гидроузлов с помощью системы мониторинга.

В нашей стране повреждалось большое количество плотин и запруд на малых реках, которые часто сооружались без необходимого обоснования данными гидрологических наблюдений и для расчетов которых принимались сечения русел рек, чаще всего недостаточные для пропуска максимальных расходов воды. В конце прошлого века произошли аварии на небольших плотинах водохозяйственного назначения в Башкортостане, Свердловской и Калужской областях, в Калмыкии, Волгоградской области, а также на плотинах малых ГЭС в Ленинградской области, на Алтае и в других регионах.

Авария, связанная с недооценкой максимальных расходов воды, произошла на плотине высотой 18 м на небольшой реке Какве на Урале в марте 1971 г. Водосбросы плотины были рассчитаны на пропуск расхода воды в 560 м³/с с обеспеченностью 0,1%. Расход переливающейся воды составил 1000 м³/с, плотина полностью разрушилась, что привело к гибели 15 человек, затоплению 1200 домов. ЧС была связана в значительной степени с наложением дождевых паводков на волну весеннего половодья.

Крупные гидроузлы в России и бывшем СССР создавались в соответствии с четко разработанным нормативом строительного проектирования, отличающимся высокими требованиями к расчетам максимальных расходов половодий и паводков различной обеспеченности. Однако в настоящее время состояние ряда крупных подпорных сооружений не полностью удовлетворяет требованиям надежной эксплуатации.

Наряду с многими причинами, увеличивающими риск повреждения или разрушения дамб и плотин, существует ряд факторов, характерных в большей степени в настоящее время только для России и стран СНГ и относящихся к разряду социально-политических и экономических. К этим факторам относится превышение нормативных сроков эксплуатации целого ряда подпорных сооружений, нарушение работы отдельных узлов и запаздывание или отсутствие профилактических ремонтов в связи с финансовыми трудностями, эксплуатация ГЭС в нерасчетных режимах и многое другое.

Вероятность разрушения подпорных сооружений в Российской Федерации выросла в период перестройки экономики, ликвидации некоторых органов управления водным хозяйством и в связи с отсутствием «хозяина» у некоторых водохранилищ.

Бесхозные малые и средние по размерам водохранилища представляют серьезную опасность, т.к. велика угроза их переполнения и прорыва плотин при интенсивном

снеготаянии и продолжительных летне-осенних осадках. Незапланированный и несогласованный с общими мероприятиями в период половодий и паводков спуск этих водохранилищ может усугубить последствия наводнений.

Весной 2006 года была проведена проверка степени готовности к пропуску паводочных расходов у 280 низконапорных гидроузлов Московской области. При этом учитывались такие факторы, как состояние плотин и водосбросов, предпаводочная сработка водоёма, наличие дежурного персонала, систем оповещения о ЧС, наличие аварийных материалов и т.д. Из обследованных гидротехнических сооружений различного назначения у 67% была установлена недостаточная степень готовности к пропуску паводка. Причем, в зависимости от форм собственности наименьшая готовность была обнаружена у бесхозных объектов, затем у сооружений различных АО, ООО и т.д. Но высокий уровень неготовности имели также и гидроузлы федеральной собственности, городских и сельских муниципальных образований [7].

Безопасность гидроузлов, особенно небольших, снижается также в связи с отсутствием у большинства собственников гидротехнических сооружений проектной документации, что мешает оценить их состояние и безопасность, установить соответствие обеспеченности расчетных расходов водосбросов классу сооружений.

Особое беспокойство вызывают возможные аварии ГЭС у гидроузлов комплексного назначения, где составные части (шлюзы, дамбы обвалования, различные водозаборы) принадлежат различным собственникам. Контроль за этими сооружениями находится на невысоком уровне, что может привести к их повреждению, прекращению работы ГЭС или снижению выработки энергии. Такие ограничения в 1999 г. отмечались на шлюзах Волжско-Камского каскада, на Павловской, Цимлянской, Новосибирской, Волховской, Свирских ГЭС, дамбах обвалования и насосных станциях Чебоксарской ГЭС. Но самое неблагоприятное положение дел у дамб золошлаковых отвалов ТЭС. Низкое качество строительства, слабый контроль, неудовлетворительное обслуживание и др. создают риск их повреждения.

В годы перестройки резко сократилась гидрометеорологическая сеть наблюдений Росгидромета в бассейнах рек, что значительно снизило достоверность гидрологических прогнозов и затруднило работу по оперативному регулированию водохозяйственных систем и своевременному предупреждению чрезвычайных ситуаций. Кроме того, невелика также сеть государственного мониторинга Министерства природных ресурсов на поверхностных водных объектах — всего 314 наблюдательных пунктов.

Угрожает безопасности гидросооружений их старение. Большинство из них эксплуатируется более 30 лет. Согласно данным мировой статистики именно в этот период возрастает вероятность аварий и повреждений гидроэнергообъектов.

Между тем, 18 ГЭС Российской Федерации в 2006 году уже перешли рубеж пятидесятипятилетней эксплуатации, а 20 ГЭС — перейдут его к 2010 г. Среди них — Волховская, Нижнее-Свирская, Нижнее-Тулумская, Нива-ГЭС-2, Углическая, Рыбинская, Лесогорская ГЭС.

Средний износ гидротехнических сооружений, определяемый по сроку службы, на самых крупных Российских ГЭС мощностью более 2000 МВт составляет 38%, а по ГЭС с мощностью от 300 до 2600 МВт — 45%. Выработка нормативного срока службы, а в ряде случаев полного ресурса, несоответствие большого числа давно эксплуатируемых сооружений действующим современным нормативам — серьёзная опасность повреждения гидроузлов и возникновения ЧС.

Важным фактором является также занижение максимальных расчетных сбросных расходов в проектах, принятых и выполненных несколько десятков лет тому назад на основании непродолжительных гидрологических рядов наблюдений. Краткость рядов по стоку обусловила неправильный выбор модели расчетного гидрографа и других гидрологических характеристик. Гидрологические данные, накопившиеся за время эксплуатации ГЭС, свидетельствуют о необходимости откорректировать значения многих характеристик режима рек, особенно максимальных расходов, наиболее существенно отличающихся от принятых ранее и определяющих пропускную способность водосбросов. Так, результаты проверок показали, что 20 ГЭС РФ имеют ограничения пропускной способности сооружений, в том числе Вилюйская, Усть-Хантайская, Саратовская, Майнская, Ириклинская, Миатлинская и Гергебильская.

Повышение надежности гидротехнических сооружений и безопасная их эксплуатация невозможны без изучения прежде всего конкретных причин, приводящих к их повреждению или разрушению.

В табл. 1 перечислены стихийные и антропогенные факторы, способные вызвать разрушения гидроузлов, основные виды аварий, сопутствующие процессы, явления, усиливающие или ослабляющие катастрофы, перечень мер по предупреждению, предотвращению и устранению последствий разрушения гидротехнических сооружений. Большинство из перечисленных природных факторов риска в свою очередь вызываются климатическими процессами, проявляющимися как в виде кратковременных и опасных

метеорологических явлений (ураганов, ливней, снегопадов, смерчей и т.д.), так и в виде периодически повторяющихся или однонаправленных, долговременных изменений климата.

Значительная часть природных стихийных факторов инициирует другие их проявления. Например, цунами, ураганы и землетрясения сопровождаются наводнениями, которые в свою очередь вызывают вспышки эпидемий и т.д.

Наиболее опасно инициирование экстремальными природными явлениями техногенных катастроф, например, разрушение атомного реактора или плотин гидротехнических сооружений. В первом случае следствием разрушения будет радиоактивное загрязнение местности, во втором — ее затопление. Очевидно, что в обоих случаях произойдет дальнейшее инициирование неблагоприятных событий, могущих создать ЧС в масштабах государства и более.

Проявления многих стихийных факторов бывают связаны со сложными труднопрогнозируемыми геофизическими и атмосферными процессами, поэтому перечисленные в табл. 1 спонтанные природные процессы неопределенны во времени, неоднородны по последствиям и трудно предсказуемы. Но общими для них являются значительный размах по территории, большое влияние на человека, окружающую его природную среду и хозяйственные объекты, в том числе гидросооружения. Общим является также тенденция роста повторяемости и ущерба при всех видах стихийных бедствий, в связи с общим ростом численности и плотности населения, прогрессом техники и усложняющейся структурой общества, увеличением объектов повышенного риска, освоением регионов, наиболее часто подвергающихся стихийным бедствиям, а также с проникновением хозяйственной деятельности людей в опасные, труднодоступные районы, где сила и частота проявления стихийных процессов выше, чем в освоенных районах.

Таблица 1.

Факторы риска, последствия разрушения гидротехнических сооружений и меры предупреждения.

<p>Факторы риска (опасные явления)</p>	<p><u>Стихийные:</u> экстремальный сток, ледовые явления, нагоны, опасные метеорологические явления (бури, ураганы, ливни, снегопады, смерчи и т.д.), долговременные изменения климата, землетрясения, цунами, оползни, обвалы, снежные лавины и сели, подвижки ледников, вулканическое извержение.</p> <p><u>Антропогенные:</u> ошибки проектирования, несоблюдение строительных норм и правил эксплуатации сооружений, непрофессионализм, некомпетентность, халатность обслуживающего персонала, военные действия, террористические акты.</p>
	<p>Сверхнормативный сброс воды.</p>

Вид аварий	<p>Перелив через гребень плотины.</p> <p>Повреждение или размыв тела плотины и береговых сооружений.</p> <p>Нарушение фильтрационной прочности различных частей гидроузла.</p> <p>Нарушение устойчивости или чрезмерные перемещения сооружений.</p> <p>Неисправность, повреждение технологического оборудования.</p>
Последствия	<p>Формирование волн прорыва, затопление и подтопление местности в нижнем бьефе.</p> <p>Опорожнение водохранилищ.</p> <p>Вытеснение воды из водохранилищ при оползнях и обвалах, заполнение их наносами.</p> <p>Потери на фильтрацию через тело плотины.</p>
Сопутствующие процессы	<p>Активизация геодинамических процессов: интенсивная эрозия в нижнем и верхнем бьефах, обрушение берегов, деформация русел и пойм. Активизация эндогенных процессов: возникновение «местных» очагов сейсмической активности.</p> <p>Залповое поступление загрязняющих веществ и наносов из водохранилища, машинного зала (в т.ч. трансформаторного масла), разрушенных волной прорыва складов, хранилищ опасных токсичных веществ.</p> <p>Формирование застойных зон в мелководных отчленениях долин, возникновение экстремальных бактериологических ситуаций.</p>
Явления, усиливающие (ослабляющие) катастрофы	<p>Число факторов, интенсивность их проявления.</p> <p>Экологическое состояние региона</p> <p>Тяжелые погодные и климатические условия.</p> <p>Уклон местности, ширина, конфигурация и геоморфологическое строения долины реки.</p> <p>Время прохождения гребня волны прорыва (сезон года, время суток).</p> <p>Плотность населения. Степень хозяйственной освоенности территории, наличие опасных технологических процессов, хранилищ токсичных веществ.</p> <p>Недооценка опасных последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф.</p> <p>Несовершенство системы обеспечения безопасности.</p> <p>Заблаговременность оповещения населения.</p> <p>Подготовленность населения, государственных служб и общественности к возможным катастрофам.</p>
	<p>Фундаментальные научные исследования, направленные на решение прикладных задач.</p>

<p>Меры по предупреждению, предотвращению и ликвидации последствий катастроф</p>	<p>Повышение профессионального уровня и подготовка кадров специалистов в области стихийных бедствий и техногенных катастроф.</p> <p>Организация служб мониторинга за опасными явлениями и состоянием гидроузлов.</p> <p>Прогнозирование факторов риска и картирование возможных последствий аварий.</p> <p>Соблюдение норм безопасности, корректировка инженерных решений на всех этапах создания и эксплуатации гидроузлов.</p> <p>Усиление охраны гидросооружений.</p> <p>Разработка системы мер по предупреждению и раннему оповещению населения, по защите населения, природных и хозяйственных объектов от катастроф.</p> <p>Обучение поведению и действиям (прежде всего населения) при ЧС.</p> <p>Разработка сценариев реагирования во время и после катастроф.</p> <p>Оказание помощи жертвам катастроф.</p> <p>Ликвидация последствий (возмещение материального ущерба, восстановление разрушений и т.д.).</p>
--	---

Самыми распространёнными природными процессами, постоянно угрожающими различного рода водохозяйственным сооружениям, являются наводнения, угрожающие более 70 % территории суши. Это не только наиболее часто встречающееся на Земле опасное природное явление, но и наиболее часто повторяющееся в многолетней перспективе и обладающее большой разрушительной силой.

Во всем мире отмечается тенденция роста ущербов при экстремальных наводнениях в силу целого ряда причин, несмотря на повышение изученности этих явлений и предпринимаемые усилия по их предотвращению и смягчению последствий. Главным фактором непрекращающегося роста ущерба от наводнений признается в первую очередь влияние заселения паводкоопасных территорий и усиление на них хозяйственной деятельности. По подсчетам А.Б. Авакяна [8], на паводкоопасных территориях проживает 1 млрд. человек, а их площадь составляет около 3 млн. км².

Наиболее распространенным типом наводнений в Российской Федерации являются наводнения, связанные с интенсивным таянием снежного покрова и подъемами уровней воды на равнинных реках. Они могут приобрести катастрофический характер, если сочетаются с весенними дождями и обильным предзимним увлажнением почвогрунтов. Одна из причин подобных наводнений, наряду с гидрометеорологическими факторами (повышенные зимние осадки и раннее снеготаяние), бесконтрольное, без соответствующего инженерного обоснования массовое сооружение небольших прудов, плотин, запруд. Все эти

емкости не всегда бывают «сработаны» к весне с тем, чтобы задержать часть паводочных вод. Но возможны и зимние наводнения от таяния снега в период оттепелей. Повторяемость выдающихся наводнений этого типа оценивается в 1 раз в 10-25 лет.

Бедствием сибирских рек являются заторные подьёмы уровней, повторяющиеся почти ежегодно и вызывающие большие затопления.

Наибольшая интенсивность, повторяемость и распространение заторных наводнений наблюдается в бассейне Лены — от верховьев до дельты и на ее притоках. Длина заторов на Лене, может достигать 50-100 км, подьёмы уровней — более 10 м. Последствия подобных наводнений – разрушения хозяйственных объектов и многочисленные жертвы.

По материалам А. Б. Авакяна и А. А. Полюшкина [9], возможны наводнения, вызванные заторами льда, формирующимися на самих водохранилищах. Это связано с более ранним установлением ледостава в зоне выклинивания подпора водохранилища по сравнению с расположенным выше речным участком, где еще продолжается шугоход. Шуга заносится под лед и уплотняет ледяной покров в этой зоне, разрушающийся весной гораздо медленней, чем в русле реки. Образующийся по этой причине затор может вызвать значительное повышение уровня и затопление прилегающих территорий. Подобное наводнение произошло в 1968 г. на водохранилище Плявиньской ГЭС.

Особое место занимают паводки и наводнения с человеческими жертвами и большим материальным ущербом, являющиеся следствием воздействия целого ряда взаимосвязанных факторов — аномального развития гидрометеорологических процессов, активного проявления экзогенных процессов, переполнения и прорыва плотин водохранилищ, размыва хозяйственных и рекреационных объектов, разрушения предприятий — источников химического и биологического загрязнения поверхностных и грунтовых вод.

Подобный многоплановый катаклизм наблюдался летом 2002 г. на Кавказе и Черноморском побережье, выразившийся в катастрофических паводках и наводнениях, активизации русловой эрозии, усиливавшихся и развивавшихся за счет активного проявления селевых процессов. Немаловажную роль при таком развитии событий сыграл человеческий фактор — неготовность спецорганов и исполнительной власти к чрезвычайным ситуациям подобного масштаба, несогласованность действий различных ведомств, беспечность населения, не покинувшего опасные места, несмотря на предупреждения.

К созданию ЧС может привести конкуренция в использовании водных ресурсов между различными отраслями хозяйства и пограничными территориями, особенно во время пропуска половодий и паводков и сброса воды из водохранилищ, при сработке уровней в летне-осенний сезоны, при установлении режимов накопления водных ресурсов в

водохранилищах и т. д. Например, неконтролируемые, несогласованные сбросы воды из водохранилищ пограничных территорий Украины и Китая. К сожалению, нет четких нормативно-правовых критериев для разрешения конфликтных гидроэкологических ситуаций не только вне, но и внутри Российской Федерации. Так, не разрешен до сих пор спор между Чувашской республикой и соседними территориями. Республика заинтересована в увеличении выработки энергии на ГЭС, вызывающей однако подъем уровней грунтовых вод и подтопление территорий в республике Марий Эл и Нижегородской области.

Другой пример. В 1984 году Средний Енисей в районе Лесосибирска подвергся зимнему затоплению из-за резкого увеличения выработки энергии на Красноярской ГЭС в связи с аварией на Экибастузской ГРЭС в период зимних холодов. Сброс воды взломал лёд, подтопил и нанёс большой ущерб лесозэкспортным организациям. Было нарушено электроснабжение ряда предприятий, вода сорвала запяни с подготовленной для переработки и экспорта древесиной, снесла ограждающие дамбы затонов в ряде портов, в том числе в г. Красноярске, разметала караваны барж, стоящих на ремонте, и т.д.

Убытки были бы значительно меньше, если бы энергетики предупредили местные власти и дали разрешение Красноярскэнерго на постепенное увеличение сброса воды через донные отверстия плотины.

.Наиболее эффективным способом борьбы с природными наводнениями является перераспределение стока путем создания водохранилищ, возможности регулирования водных ресурсов которыми определяются в основном отношением полезного объема к среднему годовому стоку реки. В бывшем СССР водохранилища по некоторым данным ликвидировали к началу 1988 г. ущерб от наводнений в среднем за год на сумму 150 млн. рублей. С их помощью была решена в основном проблема наводнений и связанных с ними бедствий на Волге, Днестре, Дону..

Однако создание водохранилищ не всегда снижает риск прохождения катастрофических наводнений, что связано с природными особенностями местности и режима реки. Так, в начале 1950-х гг. в Азербайджане для борьбы с наводнениями в бассейнах Куры и Аракса были сооружены Мингечаурский и Бахрамтапинский гидротехнические комплексы. Но после их ввода в эксплуатацию на реках произошло десять разрушительных наводнений (в 1961, 1967, 1969, 1976, 1982 и др. годах) и проведенные противопаводковые мероприятия оказались неэффективными, т. к. реки протекают по слабо наклоненным равнинам и несут большое количество взвешенных наносов, осаждающихся в их руслах. В результате на ряде участков русла рек располагаются выше прилегающей местности, и водохранилища в годы с осадками выше нормы не снимают проблему наводнений.

Спасая в большинстве случаев обширные территории от наводнений, гидроузлы однако сами могут стать источником катастрофических затоплений в нижних бьефах в случае повреждения плотин и формирования волны прорыва. Этим вопросам, в частности, факторам риска повреждений и прогнозам, посвящены многие специальные публикации, в том числе сотрудников Лаборатории гидрологии Института географии РАН (из последних — [9]).

Наводнения ниже плотин могут быть связаны не только с их повреждениями, но и с незапланированными сбросами излишних масс воды через гидросооружения. Можно привести ряд примеров наводнений, вызванных сверхрасчетными попусками. Один из последних — активный сброс воды из Новосибирского водохранилища 18 июня 2001 г., приведший к затоплению около 1300 садовых участков.

Особенно опасны наводнения, вызванные зимними попусками из водохранилищ, формирующими подвижки льда и ледоход в нижнем бьефе, сопровождающиеся подтоплением прибрежных участков. Так, зимой 1956-1957 гг. из Камского водохранилища были вдвое против нормативных увеличены попуски, вызвавшие ледоход на протяжении 60 км нижнего бьефа, и затем образование затора. В районе г. Краснокамска лед был поднят и перемещен сплошным полем, наводнением был причинен большой ущерб [3].

Напомним также о наводнении в 1988 г. в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, вызванным рядом факторов, детально проанализированных автором — свидетелем этого наводнения в период полевых работ в бассейне Енисея.

Ошибки синоптиков и гидрологов при прогнозе характера половодья на Енисее летом 1988 г., неподготовленность ложа Саяно-Шушенского водохранилища к затоплению паводочными водами, неполное обустройство русла Енисея ниже плотины Красноярской ГЭС, вынужденные запоздавшие холостые сбросы через пять водосливных сооружений плотины Красноярской ГЭС – всё это обусловило в короткое время подъём уровня воды в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на 4 м и наводнение с большим материальным ущербом. Рассмотренное событие ещё раз свидетельствует о необходимости соблюдения главного правила — в нижних бьефах гидроузлов и на территориях, подвергающихся периодическим затоплениям паводочными водами не должно быть важных, недостаточно защищенных хозяйственных объектов и жилых построек, стесняющих поток воды и могущих быть разрушенными. Но продолжает нарастать тенденция все большей освоенности, застроенности и заселенности нижних бьефов и паводкоопасных территорий, несмотря на печальный исторический опыт и предупреждения специалистов. Так, по данным Роскомвода при прорыве плотин в г. Пензе в зоне затопления может оказаться 75 тысяч человек, в г. Челябинске — 170 тысяч, а в случае прорыва плотины Волжского каскада — несколько миллионов человек.

Особенно велики жертвы и ущербы в период экстремальных гидрометеорологических событий на Урале при разрушении многих плотин водохозяйственного назначения, что связано с высокой освоенностью и заселённостью этого промышленного района и расположением заводов и прилегающих к ним населённых пунктов в нижних бьефах гидроузлов.

В период строительства и эксплуатации подпорных гидротехнических сооружений нередко проявляются неблагоприятные геодинамические процессы, создающие чрезвычайные ситуации и формирующие экстремальные геоэкологические проблемы. Выделяют следующие виды геодинамических процессов: землетрясения, приводящие к обрушениям, обвалам, оползням, деформациям геологических пород и при сильных динамических воздействиях – к повреждению и разрушению гидроузлов; гравитационные процессы – обвалы, осыпи, просадки, вызывающие деформации дневной поверхности, повреждения водохозяйственных сооружений и коммуникаций; гидрогеологические особенности территории и карстово-суффuzionные процессы, вызывающие размывы тела и основания плотин, образование пустот, карстовые проявления, заиления; криогенные процессы в зоне многолетнемёрзлых пород, выражающиеся в их оттаивании, развитии термокарста, пучениях, приводящие к деформациям оснований и самих плотин, особенно земляных.

Землетрясения представляют наибольшую опасность для гидроузлов. Статистика свидетельствует, что аварии на подпорных сооружениях в связи с сейсмическим фактором насчитывают десятки, а с учетом земляных дамб – многие сотни случаев, включая высокие плотины различных конструкций.

Только за последние 30-40 лет серьезные аварии и повреждения, вызванные сейсмическим воздействием, произошли на бетонных плотинах – Понтебо (высота 10 м, Алжир), Каньон Дель Пато (20 м, Перу), Синьфынцзян (105 м, Китай), Койна (103 м, Индия), Пакойма (113 м, США), Сефидруд (106 м, Иран), Шикань (25 м, Тайвань); на грунтовых плотинах – Хебген (высота 35 м), Сан-Фернандо Лоуэр (43 м), Сан-Фернандо Аппер (25 м) и Лос-Анджелес (40 м) – все в США, а также Эль-Инфирнильо (148 м) и Ла Виллита (60 м) – в Мексике, Сердже (57 м, Турция) и др. При этом плотины Каньон Дель Пато, Шикань, Сан-Фернандо Лоуэр были разрушены, а повреждения плотин Синьфынцзян, Койна, Сан-Фернандо Аппер могли бы иметь катастрофические последствия, если бы уровни верхних бьефов не были в момент землетрясения существенно ниже нормальных подпорных уровней [10].

Впервые вопрос о необходимости учета сейсмической опасности при проектировании и эксплуатации плотин ГЭС возник в 20-х годах прошлого века после разрушения грунтовой

плотины Шеффилд (США) высотой 7,5 м при землетрясении 29 июня 1925 г. силой 6,3 балла. Но серьезные исследования фактора сейсмичности при гидротехническом строительстве начались лишь в 1950-60-е гг. после целого ряда аварий и повреждений на перечисленных выше крупных плотинах.

В бывшем СССР в 1970-1980 гг. большой группой специалистов из различных организаций – Минэнерго СССР, Академии наук, ВУЗов, были разработаны и реализованы научные основы проектирования и строительства больших плотин в районах с высокой сейсмичностью. Это дало возможность начать широкомасштабное строительство мощных гидроэнергообъектов с высокими плотинами в сейсмически активных районах Кавказа, Средней Азии и Дальнего Востока (Токтогульская, Нурекская, Чарвакская, Курпсайская, Рогунская, Чиркейская, Ингурская, Зейская ГЭС). Но фактических сведений о состоянии плотин при сильных землетрясениях в бывшем СССР очень мало.

Наиболее серьезные инциденты произошли на энергетических объектах Армении в районе Спитакского землетрясения в 1988 году с интенсивностью в эпицентре в 10 баллов, а также в 1976 году на плотине Чир-Юрт в Дагестане, где в результате землетрясения силой 8 баллов образовались три трещины шириной до 400 мм.

В результате Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 г. произошло проседание гребня плотины озера Яцинкуль, затем ее разрушение в центральной части и формирование волны прорыва. В 1,5 км от плотины вследствие размыва около 3 млн. м³ грунта сформировался водокаменный сель высотой 12 м, обрушившийся в долину реки Тегермеч.

Многие землетрясения за рубежом и особенно в Армении показали важность обеспечения сейсмостойкости не только крупных энергообъектов, но и безаварийной работы других источников энергии, энергетического оборудования, подстанций, линий электропередачи и т. д.

Так, большой ущерб экономике Армении в период Спитакского землетрясения был нанесен в результате прекращения подачи электроэнергии из-за повреждения подстанций и линий электропередачи. Коммунальное хозяйство городов Спитак и Леникан было полностью выведено из строя, а в городе Степанакерте разрушены все электростанции.

Известны также катастрофические последствия Калифорнийского землетрясения в США 17 октября 1989 г., когда были разрушены коммунальные энергетические системы трех районов, перебои в снабжении электроэнергией вызвали выход из строя современного компьютерного оборудования на базе ВВС США в Силиконовой долине. Ущерб, который нанесен энергетике от этого землетрясения, был оценен в 8-10 млн. долл.

Особого внимания заслуживают сейсмические события XXI века в Китае, где 12 мая 2008 года в провинции Сычуань произошло сильнейшее за последние более чем три

десятилетия землетрясение силой 8 баллов, вызвавшее чрезвычайные разрушения и гибель более 80 тысяч человек.

Провинция Сычуань (юго-запад Китая) обладает значительными водными ресурсами и обширной сетью гидротехнических и гидроэнергетических объектов, среди которых четыре крупных гидроузла с высокими плотинами: плотина Зипингну высотой 156 м, Шэйпай – 132, Бику – 105,3 м, Баоцуси – 132 м.

Несмотря на близость плотин к эпицентру землетрясения (12-17 км), эти плотины выдержали сотрясения, за исключением значительных и незначительных повреждений (нарушение облицовочного бетона и разрыхление каменнонабросной плотины Зипингну, смещение плотины Бику на 30 см, разрывы облицовочных плит и стен парапетов, трещины зданий ГЭС и т. д.). Сохранность плотин была обеспечена высоким качеством проектирования, правильной эксплуатацией и своевременным принятием необходимых мер в критической ситуации.

Кроме рассмотренных четырёх крупных плотин, большому числу менее масштабных объектов землетрясением был нанесён значительный ущерб. Пострадали многие водохранилища и ГЭС, нарушена инфраструктура, водоснабжение, возникла угроза потери контроля за безопасностью и распространением водных потоков. Всего были повреждены 1583 плотины и водохранилища, из них 3 больших, 57 средних и 1523 малых водоёмов.

В связи с распространением из-за землетрясения оползней появились опасные вторичные последствия – запруды, их прорыв и затопления расположенной ниже местности [11].

Произошедшие в России землетрясения (на Кавказе, Алтае, в Хабаровском крае и др.), показали, что во многих случаях была недостаточно оценена сейсмическая опасность.

Первым этапом в уточнении сейсмической активности явилось создание новой карты сейсмического районирования РФ (СР-97)» в масштабе 1: 8000000, составленной в объединённом институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта при участии большого числа соисполнителей.

Как показывает карта, территория России очень сложна в сейсмическом отношении. Около четверти ее находится в зонах повышенной сейсмической опасности, оцениваемой 7 баллами и выше, более 5% - опасные в сейсмическом отношении зоны (горные территории).

Сопоставление старых данных с новой картой показывает, что значительная часть крупных гидроузлов расположена в зонах с более высокой сейсмичностью, чем принималась при их проектировании или строительстве. Многие энергообъекты находятся в районах с максимально возможными по силе землетрясениями интенсивностью 9-10 баллов.

В девятибалльной зоне расположены Билибинская АЭС, Саяно-Шушенская, Белореченская, Иркутская, Колымская и Усть-Среднеканская ГЭС, в десятибалльной – Чиркейская, Миатлинская, Чирюртская гидроэлектростанции.

Однако, далеко не все землетрясения вызывают катастрофические последствия. Как правило, если соблюдаются нормы антисейсмического строительства, плотины противостоят стихии.

При создании водохранилищ, преимущественно крупных, возможно возникновение возбуждённых землетрясений, вызванных самими водохранилищами в результате давления больших масс воды или ее фильтрации по разломам и изменения порового давления. Эти явления стали отмечаться в первой половине XX столетия.

Впервые связь вынужденной сейсмичности с заполнением водохранилища была установлена в районе озера Марафон (Греция) спустя два года после начала его заполнения в 1931 г. и достижения максимального уровня воды. Подземные толчки стали ощущаться с начала заполнения водохранилища, но в 1938 г. произошло разрушительное землетрясение.

Проявления возбуждённой сейсмичности были детально описаны Кальдером в 1945 г. после землетрясения в районе арочной плотины Гувер на р. Колорадо, зафиксированного сразу же после заполнения водохранилища в 1939 г. Начавшиеся наблюдения показали, что 10 из 68 построенных в США водохранилищ вызвали наведенную сейсмичность.

К настоящему времени считается установленной связь между сейсмической активностью в отдельных районах и наполнением больших водохранилищ. Проявления возбужденной сейсмичности, как правило, совпадают с катастрофическими наводнениями, быстрым наполнением водохранилищ, с работой водосбросов и отмечаются во многих странах – во Франции (арочная плотина Монтейнар и плотина Гранваль), в Южной Америке (плотина Хендрик Фервуд), в Австралии (Толбинго), в Греции (Кремаста), в США (Гувер), в Китае (Синьфын), в Пакистане (Мангла), в Швейцарии (Контра), в Алжире (Уэд-Фодд) и т. д. [12].

Самым сильным землетрясением, связанным с возведением плотин, является катастрофическое землетрясение в Индии в 1967 г. в связи с сооружением бетонной гравитационной плотины высотой 103 м на р. Койна в районе, считавшимся малосейсмичным. Но начиная с 1962 г. в процессе наполнения водохранилища под ним на небольшой глубине начали регистрировать местные сотрясения. В сентябре 1967 г. произошло около 700 подобных толчков, в том числе несколько крупных, завершившихся катастрофическим землетрясением силой 8 баллов. Почти полностью был разрушен г. Койнанагар (1,5 км от плотины), погибло 177, ранено 1500 человек, несколько тысяч остались без крова

Исследования показали, что частота и повторяемость возбужденных землетрясений обычно возрастает с увеличением высоты подпора воды плотиной и объема водохранилища. Но не только эти факторы определяют возбужденную сейсмичность – существует много высоких плотин и больших водохранилищ, где подобные явления не происходят. Например, водохранилище Пууэлл объемом 120 км³ и глубиной 140 м, созданное плотиной Глен-Каньон на р. Колорадо, Серре-Понсо во французских Альпах и ряд других, не изменили локального сейсмического режима. Общим фактором для случаев возбуждения сейсмичности является наличие специфических геологических и гидрогеологических условий и тектонической обстановки. Водоохранилища являются как бы спусковым механизмом для критически напряженной среды.

Не всегда изменения сейсмичности коррелируют с изменением уровня, что наблюдалось, например, при заполнении Токтогульского водохранилища (1974-1992 гг). По данным наблюдений Института сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики, в первые годы интенсивного заполнения водоёма (1985-1980 гг.) установлена достаточно отчётливая связь между уровнем воды и числом землетрясений. В последующие годы после начала непрерывной эксплуатации водохранилища связь колебаний уровня и числа сейсмических возбуждений прослеживается не все годы [13]

По данным Института экологии Волжского бассейна РАН и Саратовского университета, даже в равнинной местности, в зонах слабой сейсмической активности, мощные сбросы воды в нижний бьеф через плотины каскада ГЭС на Волге могут также спровоцировать местные землетрясения силой 1-2 балла в радиусе 3-4 км от плотин. Возможность проявления «наведенной» сейсмичности отмечалась и при экспертизе проектов ГЭС на сибирских реках, например, Мокской ГЭС. Следствием землетрясений являются обрушения горных пород в долинах рек и образование «завальных» (плотинных) озёр, спуск которых сопровождается прорывной волной с большой скоростью прохождения и может спровоцировать формирование селей. Так, прорыв подпрудного моренного озера Туюксу в верховьях Малой Алмаатинки в 1973 г. вызвал грязекаменный поток огромной разрушительной силы — 15-метровый вал двигался со скоростью 10 м/с, максимальный расход воды достигал 5200 м³/с, поток нес валуны весом до 300 т и был остановлен 110-метровой плотиной у пос. Медео.

Из завальных озёр наиболее известно высокогорное Сарезское озеро в Таджикистане в долине р. Мургаб, возникшее в 1911 г. вследствие 9 балльного землетрясения, сопровождавшегося обвалом 2,2 млрд. т. горных пород.

Выше уже приводились примеры аварий при переливе воды через гребень плотин. Они связаны не только с нерасчетными паводками, но и с еще рядом причин, в том числе с оползнями и обрушением в водохранилища массивов неустойчивых горных пород на значительных участках их берегов. Следствием этого являлось формирование волн вытеснения и перехлест воды через плотину. Самые трагические последствия (большие разрушения и человеческие жертвы) были вызваны волной вытеснения, образовавшейся в результате обрушения в 1963 г. в водохранилище Вайонт на р. Пьяве (Италия) скального оползня — массы меловых пород объемом 260-300 млн. м³, оторвавшихся от горы Ток на левом берегу долины. Высота всплеска у берегов водохранилища достигла при этом 270 м, а толщина слоя воды, переливающейся через гребень плотины — 70 м. Бетонная плотина выдержала перегрузки, но волна вытеснения объемом 25 млн.м³ почти полностью разрушила г. Лангароне, ряд деревень и унесла более 3000 человеческих жизней Катастрофа была связана с фактором наведенной сейсмичности при заполнении водохранилища. В 1853, 1874, 1899 и 1936 гг. оползни имели следствием обрушение пород в водохранилище Лития Бей на Аляске. Причем, в 1936 г. подводный оползень вызвал всплеск воды у берегов водохранилища высотой 30,5 м. В 1949 г. сдвиг и обрушение рыхлых пород был причиной всплеска воды высотой 19,8 м у берегов водохранилища Хоук Крик (США). Неоднократно возникали опасные волны вытеснения из-за оползней на водохранилище Лейк Леон в Норвегии и т.д. [14].

В 1959 г. оползень разделил водохранилище Понтезей в Италии на две части, значительно уменьшив его объем. В 1982 г. возник оползень на откосе деривационного канала гидроузла Вэло в Новой Зеландии, который полностью разрушил здание ГЭС. В 1990 г. в Колумбии оползень, перекрывший русло р. Ареноза, после сильного ливня перерос в селевую лавину и накрыл ГЭС Кальдерас и подстанцию слоем ила и камней толщиной 15 м. Погибло 20 человек, повреждены 8 деревень, 8 мостов, 20 км дорог и небольшой город Сан-Карлос. Крупная авария произошла в 1991 г. в Румынии, когда ГЭС Клэбучет была выведена из строя оползнем, образовавшимся после прорыва воды из напорного туннеля и перекрывшим долину реки. При этом было нарушено водоснабжение Бухареста.

Формированию оползней и связанных с ними ЧС способствует ряд природных и техногенных факторов: рельеф, своеобразная структура и состав пород, гидрогеологические, гидрометеорологические и сейсмотектонические условия, а также техногенные нагрузки — подрезка нижних участков склонов, изменения гидрогеологических условий в процессе строительных работ и заполнения водохранилищ, сработка уровней в процессе их эксплуатации, буровзрывные работы и т.д. Последнее наблюдалось у ряда гидросооружений: Ташлыкской ГЭС-ГАЭС, шлюза Днепрогэс-2, Колымской ГЭС, а также ГЭС Хоабинь во

Вьетнаме и т.д. Нередко экзогенные процессы проявляются в результате активизации древних оползней. Например, на плотину Миатлинской ГЭС, построенную в 1977 г., с 1978 г. со стороны правого берега движется оползень объемом 3 млн. м³, он уже «прошел» путь более чем в 30 м. Оползень объемом около 10 млн. м³ в районе правого берега плотины Мингечаурской ГЭС на р. Куре активизировался спустя 35 лет после начала ее эксплуатации. Провоцирующим фактором был сильный ливень (за сутки выпало около 80 мм осадков) и развитие глиняного карста из-за подмыва рекой толщи глинистых песчаников. Немаловажным дополнительным фактором явилось падение слоев коренных пород согласно склону, а также сейсмичность территории. Формированию оползневого участка длиной 500 м способствовал также режим сработки водохранилища, переработка нижней части склона и, что очень существенно, подрезка склона дорожными выемками [15].

В ноябре 1991 г. (спустя 15 лет после начала эксплуатации) на левобережном примыкании плотины Чиркейской ГЭС произошло обрушение породы объемом около 5 тыс. м³, 3 ноября 1992 г. обрушилась часть левобережного откоса объемом 500 м³ у примыкания плотины Саяно-Шушенской ГЭС. В этих двух случаях провоцирующими факторами явились предшествующие периоды высокой сейсмической активности, вызвавшие максимальные арочные напряжения плотин в зоне обрушения в холодное время с обильными осадками.

Строительство и эксплуатация крупных гидроузлов на Волге, Днепре, Дону, Оби, Енисее и Ангаре и других реках сопровождалось абразией берегов и активизацией оползней, осыпей, сколов и т. д. В настоящее время протяженность абразионных берегов составляет значительную часть береговой линии современных водохранилищ России. Наиболее активно эродируемые берега — на водохранилищах юга Сибири; здесь величина абразии и скорость отступления бровки береговых уступов (до 150 м за сутки у пос. Артумей на Братском водохранилище) превысили все известные ранее в нашей стране (в среднем в интервале 3-6 м/год, максимум 15-20 м/год). Из общей протяженности берегов существующих и строящихся водохранилищ Сибири (30 тыс. км) около 10 тыс. км затронуты процессами переработки. Наибольшая протяженность обрушаемых берегов наблюдается на Братском, Красноярском и Иркутском водохранилищах и составляет соответственно 20, 30 и 60% от общей длины береговой линии. Наименее распространены абразионные берега на Хантайском, Усть-Каменогорском и Мамаканском водохранилищах.

Вопреки прогнозам, спустя 15-20 лет после заполнения водохранилищ стабилизация берегов не наступила, а, напротив, ранее нейтральные берега стали со временем абразионными (например, на Новосибирском и Усть-Каменогорском водохранилищах). Активизации процессов абразии способствуют изменения уровней водохранилищ, связанные с колебаниями водности рек, сработкой водохранилищ для нужд различных

водопользователей и водопотребителей и с недостатками планирования наиболее экономичных вариантов использования водных ресурсов.

Значительная часть крупных ГЭС России расположена в суровых по природным условиям регионах, в зоне многолетнемёрзлых пород (ММП). Это Виллюйская, Хантайская, Колымская, Курейская, Зейская, Мамаканская ГЭС, а на юге криогенных областей – крупнейшие гидроузлы Ангаро-Енисейского каскада. Функционирует также целая сеть небольших искусственных водоёмов, образуемых плотинами. Все перечисленные гидросооружения активно эксплуатируются и являются надёжными источниками водо-, электро- и теплоснабжения.

Плотины ГЭС и водохранилища являются одними из наиболее крупных инженерных сооружений в зоне многолетнемёрзлых пород и активно с ними взаимодействуют. Около 50% аварий на гидроузлах происходит в зоне ММП вследствие неучёта криогенных процессов в теле плотин, их основаниях и в районах примыкания. Главными факторами развития таликов в районе гидроузлов, деградации мерзлоты и создания аварийных ситуаций является влияние водных масс водохранилищ, изменение гидрогеологических условий в основании плотин и на прилегающих участках, изменений микроклимата и условий теплообмена, физико-технических свойств мёрзлых пород и др. Всё это приводит к развитию на берегах водохранилищ термокарста, термоэрозии, солифлюкции, изменению наледообразования. За счёт просадок дна при оттаивании мёрзлых пород происходит увеличение объёмов водохранилищ на 15% и более, что задерживает достижение НПУ, осложняет условия эксплуатации водохранилищ, снижает выработку энергии.

Увеличение объёма за счёт термопросадок впервые было установлено у Усть-Хантайского водохранилища, НПУ которого был достигнут лишь спустя 20 лет после заполнения водоёма, при этом его объём увеличился на 14%.

Термопросадки наблюдались и у Виллюйского гидроузла: в первые четыре года многолетнемёрзлые породы протаяли под плотиной, где ощущалось наибольшее воздействие на ММП, на глубину в 9 м, в остальные годы – на 6-9 м, а наибольшая величина протаивания достигала 14 м.

Аналогичные последствия прогнозируются, например, на Селемджинском водохранилище, где термопросадки в течение 5-10 лет могут вызвать приращения мертвого объёма на 5%, требующие дополнительных водных ресурсов.

В процессе строительства и эксплуатации были обнаружены просадки в теле плотины Усть-Илимской ГЭС. Это происходило в связи с тем, что в каменной наброске плотины образовался клин мерзлого тела, который затем растаял. Т. е. в условиях суровых зим оказалось возможным образование временного слоя мерзлых пород, дающих осадку плотин.

Оттаивание мерзлых пород и последующий вынос материала волнением и течением обусловили существенное увеличение глубин водохранилищ в прибрежной зоне. Таким образом, приглубость берегов – характерная черта водохранилищ зоны ММП.

Катастрофическими могут быть в условиях сурового климата последствия зимней сработки уровней и обнажения значительных площадей мелководий в хвостовой части водохранилищ – мест зимовки, нагула и нереста рыб. Эти обстоятельства ухудшают условия жизни водных животных, лишаящихся свободного выхода в воду подо льдом. Кроме того, значительная зимняя сработка, например, Зейского водохранилища, способствует морозным деформациям мелководий, промерзает до 65% площади наиболее продуктивных мелководий Хантайского водохранилища – места нагула и нереста сиговых рыб.

Ранее упоминались аварийные ситуации на каменно-земляной плотине Колымской ГЭС в 1988 году и прорыв напорного фронта с выносом значительного объема грунта у плотины Курейской ГЭС в 1992 году. В обоих случаях были недостаточно учтены особенности геологических условий основания и самих плотин в процессе изысканий в зоне ММП.

Можно привести еще ряд примеров, иллюстрирующих чрезвычайные ситуации при создании плотин в зонах с суровым климатом и распространением ММП. Многие из них связаны с недостаточным опытом прогноза последствий создания ГЭС в зоне ММП и свидетельствуют о необходимости накопления и систематизации наблюдений на функционирующих гидроузлах в криолитозоне и разработки специальных методов прогноза взаимодействия геокриологических условий с подпорными сооружениями.

К сожалению, нередко в процессе изысканий не учитывается ряд обстоятельств, очень важных для оценки инженерно-геологических условий строительства гидроузлов, отражающихся на их безопасности. Специалистами отмечается необходимость повышения качества изысканий и уточнения проектных решений в процессе строительства энергообъектов. Такие уточнения были осуществлены на ряде ГЭС – Колымской, Вилюйской, Курейской, Бурейской, Богучанской, а также Рогунской, Ташкумырской и др.

Нельзя не сказать о таком явлении в нижних бьефах ГЭС, как образование полыньи, размеры которой зависят от емкости и термического режима водохранилищ, величины зимних попусков, метеорологических условий зимы (температуры воды и воздуха), гидравлических характеристик нижнего бьефа. Это негативное последствие создания ГЭС свойственно всем крупным водохранилищам. Так, большая полынья образуется у Волжской ГЭС. Но в наибольшей степени ее влияние проявляется у сибирских водохранилищ, в зоне сурового климата, особенно в нижнем бьефе Красноярской ГЭС, где длина полыньи колеблется от 50 до 500 км. Полынья является источником формирования шуги, скопления

которой осложняют работу водозаборов, формирует зажоры, ухудшает метеорологические условия, вызывает частые туманы, что отрицательно сказывается на условиях жизни и здоровье населения, затрудняет рекреационное использование прибрежных районов, может создавать помехи в работе наземного и воздушного транспорта, нарушать ледовые переправы, способствовать обмерзанию проводов, усугублять явления смога в крупных промышленных центрах, т. к., концентрация промышленных выбросов в тумане возрастает в 2-3 раза.

ЧС могут возникнуть вследствие недостаточного инженерно-геологического обоснования проектов, приводящего к неверной оценке надежности оснований плотин и фильтрационных свойств слагающих материалов, нередко влекущей за собой неправильный выбор местоположения гидросооружения, его тип, параметры и технологические особенности строительных работ. Аварии на гидроузлах, связанные с этим фактором, угрожают их безопасности и требуют скорейших, а на некоторых сооружениях – незамедлительных действий.

В США, в бассейне р. Тенесси, была построена плотина Хейлс-Бор на известняках, содержащих много карстовых пустот. Для их заполнения было истрачено 5000 тонн цемента, однако фильтрация под плотиной продолжалась. Были неудачные попытки заполнить полости цементом, глиной и другими материалами. В конечном итоге пробурили скважину глубиной 27 м, через которую закачали 1300 м³ горячего жидкого асфальта.

Наличие закарстованных пород привело к ЧС ещё на ряде гидроузлов. По материалам Говорущко О.С., на юге Испании была возведена плотина Монте-Хаке высотой 72 м. Однако водохранилище не удалось заполнить в связи с распространением сильно трещиноватых закарстованных юрских известняков.

Аналогичные события произошли с плотиной Сен-Гильельм-Ле-Дезер на р. Эро во Франции.

Авария, связанная с недооценкой геологических условий и дефектами строительства, явилась причиной прорыва плотины Курейской ГЭС. Недостаточная изученность геологического строения, пород и их свойств привела к затоплению деривационного туннеля Ингурской ГЭС (не были учтены карстовые проявления слоистых известняков). Плохо выполненная гидроизоляция стала причиной фильтрации в деривационном туннеле Храмской ГЭС, дефекты в зоне сопряжения грунтовой плотины с основанием у Кривопорожской ГЭС в Карелии и, наконец, проявления фильтрации в плотине Саяно-Шушенской ГЭС.

Аварийные ситуации на различных участках гидроузлов возникают в результате несоблюдения проектных отметок уровней и нестандартных условий эксплуатации в течение

длительного времени. Нижнекамская ГЭС эксплуатируется при несоответствующей проектной подпорной отметке. Поэтому Воткинская ГЭС функционирует при отсутствии подпора со стороны водохранилища Нижнекамской ГЭС. Кроме того, вследствие трансформации русла Камы уровни нижнего бьефа Воткинской ГЭС оказались на 1 м ниже проектных. Эти обстоятельства, а также работа Воткинской ГЭС со значительными суточными изменениями нагрузки и, соответственно, со значительными колебаниями уровней нижнего бьефа, вызвали размыв и разрушения слабо закрепленных участков в зоне переменного подпора. А именно, значительные деформации левобережного откоса отводящего канала (просадки и разрушения плит крепления) и местные деформации дна.

В некоторых случаях возможные ЧС, в том числе неготовность ГЭС работать в нештатных или аварийных ситуациях, были «заложены» в проект. Так, на многих гидроузлах России и стран бывшего СССР из-за отсутствия глубинных водосбросов невозможна глубокая сработка водохранилищ в случае экстренной необходимости. Это заставляет прибегать к рискованным решениям, как было, например, при необходимости глубокой сработки Токтогульского водохранилища. А именно, раскрывать с помощью взрыва уже заделанные отверстия временных водосбросов строительного периода [16].

Другой пример - Плявиньская ГЭС на моренных отложениях. В случае начавшегося суффозионного размыва в нижнем бьефе ГЭС предотвратить развитие аварии на плотине практически невозможно из-за использованной компоновки основных сооружений гидроузла, т. к. в этом случае необходима сработка воды водохранилища для подавления суффозионного размыва. Но техническое устройство гидроузла таково, что сброс воды будет происходить на поврежденный участок нижнего бьефа. Здесь мог бы помочь дополнительный водосброс, отводящий воду ниже по течению.

Кроме плотин и водохранилищ, в состав гидроузлов входят судоходные каналы и шлюзы, аварии на которых имеют свои специфические особенности. Наиболее ранняя из известных нам аварий произошла в 1962 году на шлюзе Воткинской ГЭС, когда во время шлюзования упала секция подпорной стенки шлюза из-за неполной засыпки её грунтом. В камере шлюза находился теплоход с 400 пассажирами, 21 человек погиб. Только благодаря своевременным и решительным мерам, предпринятым капитанами всех судов, находившихся также в камере шлюза, удалось избежать ещё более тяжких последствий [4].

Особое внимание функционированию подпорных гидротехнических сооружений уделяется в последние годы не только из-за их неудовлетворительного во многих случаях технического состояния, возраста, но и опасения возникновения чрезвычайных ситуаций в условиях глобального потепления климата (ГПК) и изменения водных ресурсов.

Детально эти вопросы обсуждались автором в ряде специальных публикаций, в том числе в этом журнале [17]. Напомним, в условиях ГПК прогнозируются следующие возможные трансформации водных ресурсов – увеличение стока основных рек, рост его изменчивости в течение года и в многолетнем ряду, увеличение экстремальных значений, сокращение весеннего стока и рост зимнего; изменение качественных показателей водных ресурсов вследствие увеличения растворимости многих загрязняющих веществ, снижение разбавляющей способности вод и способности рек и водоёмов к самоочищению, рост безморозного периода, приводящего к изменению сроков вскрытия и замерзания рек и водоёмов, а также к увеличению мощности ледяного покрова, повторяемости заторов, изменению подземного стока и стока межени. Возможно ухудшение медико-биологической обстановки, рост вероятности и площадей распространения стихийных явлений, увеличение повторяемости и мощности наводнений, активизация геодинамических процессов и т. д.

Перечисленные изменения водных ресурсов в условиях ГПК отразятся на размерах, структуре и характере водопотребления и водопользования, с которыми связаны проблемы управления водными ресурсами, экономические, экологические и демографические потери. Смягчение неблагоприятных последствий возможно путем создания управляемого водного режима рек с помощью водохранилищ, т. к. бассейны рек с регулируемым стоком (с контролем за потреблением или распределением воды) более мягко реагируют на климатические изменения, чем бассейны, где регулирования стока нет.

Важным последствием прогнозируемого роста стока рек России в связи с глобальным потеплением климата является увеличение выработки электроэнергии гидроэлектростанциями. О масштабах увеличения производительности ГЭС можно судить по наблюдающимся изменениям соотношения стока и выработки в современных условиях. Так, в январе-феврале 2007 г. объём производства электроэнергии в России составил 185 млрд. кВтч, что оказалось на 2,1% ниже аналогичного периода 2006 года. Причём, в это время снизилась выработка на АЭС на 3,9% и у ТЭС – на 3,4%, а на ГЭС увеличилась на 18,4%, что связано с аномальными погодными условиями на всей территории страны и с увеличением в последнем случае притока воды в водохранилища. На Волжско-Камском каскаде (на водохранилищах Иваньковском, Угличском, Рыбинском, Горьковском, Чебоксарском и Жигулёвском) приток был наибольшим за всю историю наблюдений – в январе 2007 г. 19,5 км³ при норме 7,1 км³, в феврале 12,8 км³. Количество поступившей воды в водохранилища каскада было сопоставимо с весенними паводочными расходами, что вызвало зимние попуски и наводнения, открытие донных водосбросов у большинства водохранилищ для освобождения «места» для весеннего половодья.

На востоке страны приток воды к водохранилищам также превысил норму: у Саяно-Шушенской ГЭС – на 40%, Новосибирской ГЭС – на 20%, Бурейской ГЭС – на 70%. За счёт повышенной водности рек ГЭС выработали более высокие объёмы электроэнергии. В январе-феврале выработка на Волжско-Камском каскаде была на 60% выше плановых показателей, а в целом для всех станций, контролируемых ОАО «Гидро ОГК» - на 24% выше плана. На Саратовской ГЭС выработка в феврале 2007 г. была наивысшей за всю 40-летнюю историю её эксплуатации.

Рассмотренные ЧС, связанные с созданием плотин и водохранилищ, приурочены в значительной степени к периодам многоводных лет или сезонов. Но маловодные периоды оказывают нередко не меньшее влияние на функционирование гидротехнических систем.

Роль маловодья в создании ЧС наиболее остро проявилась в Сибири в 1976-1982 гг., а также в 1982-1984 маловодных годах, когда происходили нарушения нормального электроснабжения на значительных территориях. Электроснабжение на многих промышленных предприятиях лимитировалось в связи с этим специальными постановлениями Совмина СССР.

Главная причина сложившейся ситуации - в длительном маловодье, охватившем верхние участки бассейнов рек Енисея и Ангары и бассейн оз. Байкал, начавшемся в зимнюю межень 1975-1976 гг. и длившемся до весеннего половодья 1982 г. Расходы воды в этот период оказались существенно ниже расходов за расчётный период 1922-1929 гг., положенных в основу проектов ГЭС и определяющих гарантированную мощность и бесперебойное электроснабжение. Подобная чрезвычайная ситуация была определена гидротехниками как «гидрологическая авария».

Наиболее сложная ситуация сложилась в 1981-1982 гг., т. к. к концу 1981 года все водохранилища Ангаро-Енисейского каскада были опорожнены, в том числе в связи с необходимостью ускоренного заполнения вводимого в строй Усть-Илимского водохранилища.

Экономические ущербы вследствие маловодья были весьма существенны. На всех водохранилищах Ангаро-Енисейского каскада были снижены санитарные и судоходные попуски, на Братском водохранилище в межень нарушена работа всех водозаборов, ограничались сроки судоходства, из-за снижения выработки энергии остановился ряд предприятий или работал с недогрузкой, произошёл размыв сложившегося профиля равновесия береговой зоны водохранилищ.

В маловодные годы так же, как на Ангаре, был введён в эксплуатацию ещё ряд водохранилищ – Верхнее-Волжские, Бухтарминское, Вилуйское, что намного снизило их энергоэффективность в период заполнения водоёмов и некоторые последующие годы.

Критическая ситуация со снабжением потребителей электроэнергией и водой явилась следствием крена в Сибири в сторону гидроэнергетики, что обусловило нерациональную структуру генерирующих мощностей и привело в период маловодья к лимитированию использования электроэнергии потребителями или даже её отключению. И, наоборот, в последующие многоводные годы производились «холостые» сбросы воды, вызвавшие недовыработку миллиардов кВт/ч электроэнергии, т.е. большие экономические потери.

Всё это свидетельствует о том, что при оценке надёжности электроснабжения следует учитывать экстремальные ситуации – крайние маловодья (непредусмотренные проектом), использование водных ресурсов водохранилищ не по проектному назначению («смена лидера» в использовании водных ресурсов водохранилища), а главное, гипотетическую возможность аварий и катастроф на гидросооружениях.

Заключение

- 1) Вопросы безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений необходимо начинать с выявления причин их возможного повреждения (факторов риска), изучения статистики видов аварий и их последствий, сопутствующих процессов, явлений, усиливающих или ослабляющих катастрофы.
- 2) Разделение катастроф на природные и антропогенные в большинстве случаев условно, т. к. многие ЧС, вызываемые природными факторами, прямо или косвенно связаны с антропогенным прессом человека на природную среду (в том числе с нерациональным размещением технических объектов, с неразумной их эксплуатацией и т. д.).
- 3) ЧС, независимо от их характера, вызывают экологические последствия, которые по своей тяжести превышают непосредственные прямые ущербы. Это прежде всего экологические потери – гибель людей или ухудшение их здоровья, миграционные процессы, ухудшение социально-психологической обстановки (депрессия, чувство страха, проявления агрессивности, протестного потенциала и др.).
- 4) Необходима разработка нескольких «сценариев» прогноза ЧС и последствий, учитывающих внутривековые колебания водности рек и изменения в связи с глобальными изменениями климата. В противном случае гидроузлы окажутся в существенно иных условиях, нежели те, на которые рассчитана их эксплуатация.
- 5) Опыт эксплуатации ГЭС в различных странах свидетельствует о том, что полностью исключить ЧС на гидроузлах невозможно, но необходимо свести их к минимуму с помощью серии мероприятий, прежде всего путём осуществления прогноза возможных бедствий.
- 6) С целью прогноза ЧС необходим непрерывный мониторинг, включающий

не только наблюдения за работой оборудования, но и контроль за правильностью действий эксплуатационного персонала, т. к. инструкции не всегда строго их регламентируют. В связи с этим важны квалификация персонала и его способность к принятию решений и грамотным действиям в условиях ЧС.

7) Прогноз и заблаговременное предупреждение ЧС позволяют (при проведении соответствующих мероприятий) не допустить развития неблагоприятных ситуаций и снизить тяжесть последствий. Так, использование только гидрометеорологических прогнозов позволяет сократить экономические потери от ЧС различного характера на 40%.

8) Необходимо соблюдение требований к обеспечению безопасности всех элементов ГЭС, как при их проектировании, так и при эксплуатации, особенно у гидроэлектростанций, работающих в изолированных системах.

9) Использование эффективных механизмов предотвращения ЧС на гидроузлах и обеспечения их безопасности представляет собой существенный аспект проблемы национальной безопасности Российской Федерации.

Список литературы

1. Семёнов А.Н. 68-й Исполком и 20-й Конгресс Международной комиссии по большим плотинам. // Гидротехническое строительство, 2001, № 4, с. 48-56.
2. Dams and development. The Report of the World Commission on Dams. EARTHSCAN. London and Sterling, VA. November 2000. P. 404.
3. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Антропогенные факторы наводнений // Водные ресурсы, 1989, № 3, с. 5-13.
4. Радкевич Д.Б. О реализации Федерального Закона «О безопасности гидротехнических сооружений». // Безопасность гидротехнических сооружений, НТФ «Энергопрогресс», Гидротехническое строительство, 2000, вып. 1, 55 с.
5. Бобков С.Ф. Боярский В.М. и др. Основные факторы учёта пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности // Гидротехническое строительство, 1999, №4, с.2-9.
6. Асарин А.Е., Семенов В.М. Расчётные паводки и безопасность плотин // Гидротехническое строительство, 1992, №8, с.55-57.
7. Каганов Г.М., Волков В.И., Секисова И.В. Результаты предпаводкового обследования 2006 г. гидроузлов Московской области // Гидротехническое строительство, 2007, №4, с.2-9.

8. Авакян А.Б. Наводнения в прошлом, настоящем и будущем: концепция защиты. // Бюллетень «Использование и охрана водных ресурсов в России», 2001, № 10, с. 43-52.
9. Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М: Наука, 2005, 354 с.
10. Савич А.И., Бронштейн В.И. Современное состояние и пути обеспечения сейсмостойкости и гидродинамической безопасности крупных энергообъектов // Гидротехническое строительство, 2000, № 8-9, с. 60-70.
11. Жиа Жинсенг, Си Зепинг, Чен Хоукун. Землетрясение в Китае и его воздействие на безопасность плотин (Китайский национальный комитет по большим плотинам) // Гидротехническое строительство, 2008, №12, с.43-47.
12. Гупта .К., Расторги Б. Плотины и землетрясения. М: Мир, 1979, 251 с.
13. Камчибеков М.П., Егембердиева К.А. Сейсмичность территории Тактогульского водохранилища за 1961-2006 гг. // Гидротехническое строительство, 2007, №9, с.28-34.
14. Дерюгин Г.К., Наумов О.С. Разрушение плотин в связи с пропуском сбросных расходов // Гидротехническое строительство, 1995, №7, с.30-33.
15. Марчук А.Н., Марчук Н.А. Плотины и геодинамика. Опыт натурных наблюдений. МИФЗ РАН, 2006, с.
16. Носова О.Н., Александровская Э.К. К вопросу контроля за надёжностью и безопасностью эксплуатируемых гидротехнических сооружений // Метеорология и гидрология, 1999, № 1, с.21-26.
17. Малик Л.К. Возможное влияние глобального потепления климата на водные ресурсы и объекты энергетики//Гидротехническое строительство, 2005, № 5.