

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, СВЯЗАННЫХ С ПОПУСКАМИ ЧЕРЕЗ ГЭС, ПРИ ПРОГНОЗЕ БЕРЕГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ.

С.А. Артемьев, Е.М. Шумакова, А.В. Котляков
Институт водных проблем РАН, г. Москва

Несмотря на серьезное изучение процессов деформации берегов рек и водохранилищ и факторов, влияющих на них, проблема далека от решения, а сами деформации широко распространены. Так, из общей протяженности волжских берегов, по данным института «Гидропроект», почти полторы тысячи километров берегов подвержены деформациям, близким к катастрофическим для расположенных в береговой зоне сооружений различного назначения. В последнее время обострилась ситуация в Рыбинске, где активизация размывов сменила период относительной стабилизации, продолжавшийся не одно десятилетие. В Ульяновске береговые размывы приводят к активизации оползневых процессов. В Тольятти и Жигулевске ведется постоянная борьба с русловыми и береговыми размывами. Многие прибрежные города и поселки Ульяновской, Самарской, Саратовской областей и др. ощущают на себе воздействие береговых деформаций. В тоже время осуществление берегозащитных мероприятий требует материальных затрат, оцениваемых из практики последних лет в несколько десятков миллионов рублей на один километр. При этом укрепление берегов производится исходя из существующих к настоящему времени методов расчета береговых деформаций, учитывающих лишь динамику течений и волновые процессы на водохранилищах. Изучение и оценка масштабов, направленности и возможных последствий береговых процессов, попытка их прогнозирования и разработка рекомендаций по предотвращению или снижению возможных негативных последствий является на сегодняшний день актуальной, иногда неотложной задачей для обеспечения безопасного проживания, водоснабжения, отдыха населения, а также для сохранения береговых территорий, тем более созданных искусственно.

Экспериментальные исследования в районе Рыбинской и Жигулевской ГЭС показывают, что на береговые деформации влияет режим попусков и возникающие при этом длинноволновые возмущения, а в районе Жигулевской ГЭС еще и вибрации грунтов, слагающих берега, наиболее интенсивные в период пропуска половодья через водосливную плотину, создающие динамические нагрузки на сооружения, расположенные в береговой зоне.

Схожие проблемы возникают на других гидроузлах, например, в Волгограде.

В районе Рыбинского гидроузла попуски при суточном и другом регулировании работы ГЭС приводят к возникновению целого ряда гидродинамических эффектов. Так, при продолжительной работе трех агрегатов ($1800 \text{ м}^3/\text{с}$), когда течение в его нижнем бьефе можно считать квазиустановившемся, возможна турбулентная диффузия загрязнений из

донных отложений, но невозможна деформация берегов, состоящих даже из тонкодисперсного материала. Когда в течение 1 часа последовательно включаются в работу три агрегата ГЭС и возникает волна попуска объемом 1800 м^3 , высотой 1.5 м и скоростью распространения сбрасываемого объема воды 1.5 м/с, в прибрежной зоне возможно движение частицы грунта, слагающего береговой откос, размером не менее 10^{-3} м, а с учетом турбулентности – взвешенных частиц наносов размером $\geq 0.5 \times 10^{-3}$ м. Полученные оценки осреднены за время попуска. В это же время имеются существенные флуктуации скорости течения и уровня свободной поверхности за счет волновых движений, увеличивающие мгновенные придонные скорости. Кроме того, при взаимодействии вновь сбрасываемых водных объемов с частично подпертым (Горьковским гидроузлом) водным объемом формируется сложная система циркуляции, в местах диссипации циркуляционного течения наблюдаются наибольшие береговые деформации, формируется наиболее глубокая яма размыва в прибрежной части русла.

Режим попусков и изменение скоростей течений влияет на экологическую ситуацию в зоне влияния гидроузлов. Поскольку сбросы сточных вод разной степени очистки осуществляются ежедневно и круглосуточно, при остановке агрегатов ГЭС загрязняющие воды примеси аккумулируются в районе сброса сточных вод. После запуска агрегатов ГЭС возникает турбулентная диффузия загрязнений из донных отложений, аккумулированных за период, когда агрегаты ГЭС не работали. Концентрации загрязняющих веществ в воде существенно увеличиваются в начальный период попусков ГЭС, а затем, в связи с усилением перемешивания вод, начальные концентрации загрязняющих веществ в водах нижнего бьефа гидроузла довольно быстро уменьшаются.

Таким образом, режим работы Рыбинского гидроузла определяет динамику течений в нижнем бьефе, особенно в его приплотинной части, а гидродинамические характеристики течений определяют экологическое состояние акватории нижнего бьефа.

Для района Жигулевской ГЭС в 60-70-х годах изучались волны попуска и показывалось возникновение длинноволновых возмущений, имеющих скорость распространения много большую, чем волна попуска, а также возможность повышения скоростей течений в связи с ее прохождением. Однако всегда имелось в виду волновое возмущение с периодом, соответствующим периоду возмущения (режиму работы ГЭС), и подобные волновые возмущения не рассматривались как фактор деформаций.

На фоне изменений уровня воды, согласующихся с режимом выработки электроэнергии, проявляются сложные колебания уровня в 10-20 см с периодами ~ 60 мин. и колебания уровня $\sim 0,5$ м и периодами $\sim 15-20$ мин. (рис.1), более выраженные непосредственно у ГЭС.

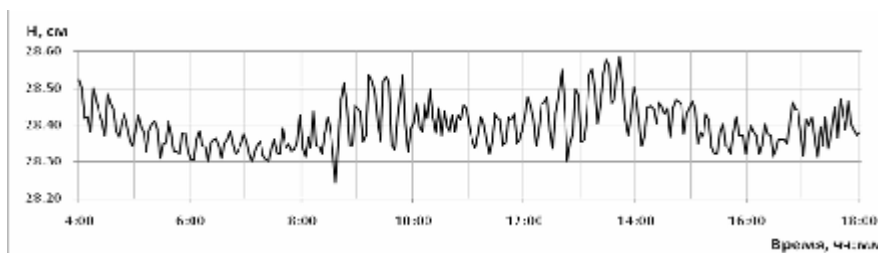


Рис. 1. Уровень воды. НБ. ОАО «Жигулевская ГЭС»

Для волн с периодами несколько часов расчетные донные скорости не превышают 1 см/с во всем возможном диапазоне изменения уровня воды, транспортирующая способность потока лежит в районе 0,01-0,02 см. Для волн с периодами 5-30 мин. и амплитудами до 0,5 м в межень и до 1 м в половодье могут возникать существенные придонные скорости при выходе волн на левобережное мелководье как выше, так и ниже ГЭС - более 5 см/с, в заливе 7,5 – 12,5 см/с. Волны с периодом ~1,5 минут и изменениями уровня 0,15 - 0,3 м также могут создавать существенные придонные скорости 3,7 - 7,5 см/с. Таким образом, при пропусках через гидроагрегаты ГЭС в результате возникновения волн так называемого инфрагравитационного диапазона в мелководной части могут возникать значительные придонные скорости, превышающих критические размывающие для свойственного данной территории типа грунтов.

Отличительная особенность района Жигулевской ГЭС в том, что возможна активизация береговых размывов также и в верхнем бьефе.

В период пропуска половодья в нижнем бьефе на фоне колебаний уровня существует интенсивное волнение (рис.2), визуально схожее с ветровым, которое практически во всем диапазоне разброса характеристик волнения ($\lambda = 1 \div 6$ м) и изменения глубин ($H = 1 \div 6$ м) может создавать придонные скорости до 1 м/с.



Рис. 2. Волнение, схожее с ветровым

Достаточно сложно соотнести деформации с действием конкретного фактора. Однако вблизи Жигулевской ГЭС существует участок, особенности которого – глубоко вдающийся в полуостров залив - исключают влияние направленного стокового течения и ветрового волнения, при этом здесь подмыто основание дамбы, служащей одним из берегов залива (рис. 3).

Здесь имеют место постоянные квазипериодические колебания уровня воды с интервалом 12-15 мин., амплитудой до 30 см, интенсивные возвратно-поступательные движения воды во время периодических подпоров со стороны русла. Дополняет картину прохождение одиночных длинных волн с амплитудами до 50 см в моменты включения и выключения гидроагрегатов ГЭС (обычно отмечаемое два раза в сутки утром и вечером).



Рис. 3. Размыв дамбы в нижнем бьефе ГЭС

Волновой процесс переноса энергии падающей вод продолжается за границами водной среды, проявляясь в виде вибраций грунтов не только на урезе воды, но и в глубине территории. Вибрации ощущаются субъективно, объективно их можно инструментально зафиксировать как изменение скоростей смещений массы приповерхностных грунтов, сооружений, расположенных на берегу и в глубине территории.

Амплитудный и частотный состав вибраций изменяется в зависимости от времени суток, сезона года и др. Максимальная интенсивность колебаний наблюдается в период пропуска половодья через ВСП. Изменения интенсивности микросейсм в этот период происходят синхронно с режимом работы водосливной плотины (рис. 4). Корреляция между интенсивностью микросейсм и мощностью попусков через ВСП изменяется за период 1999-2006 гг. от $r=0,89$ в 2003 г. до $r=0,98$ в 2006 г., в среднем равна $r=0,95$. Зависимость интенсивности вибраций от мощности попусков может быть выражена уравнением линейной регрессии $V_z = 1,3 k Q + 2$, где коэффициент $k=10^{-9} \text{ м}^{-2}$,

V_z – скорость вертикальных колебаний, м/с; Q – объем холостых сбросов, м³/с; коэффициенты могут изменяться.

Отклонение фактических значений от рассчитанных незначительно: $\sigma_{\text{ср}} = 1,9$ мкм/с при значениях скоростей 10÷25 мкм/с.

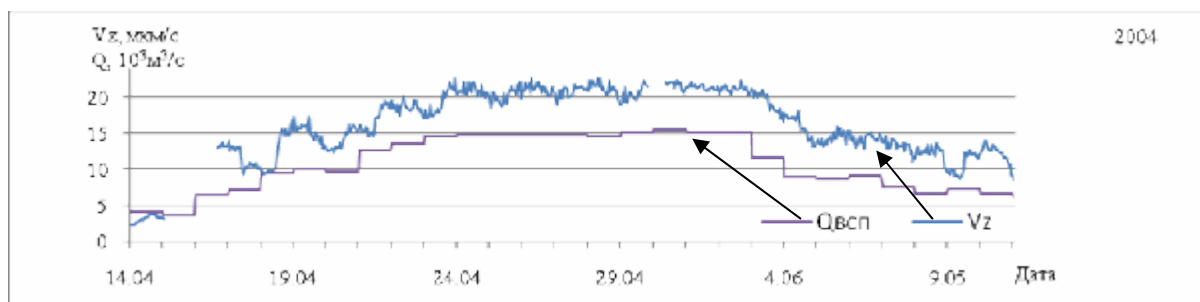


Рис. 4. Связь интенсивности вибраций грунтов с расходами воды через водосливную плотину Жигулевской ГЭС

Корреляция процессов в среднем за период 8 лет составляет 0,95, что позволяет говорить о существовании зависимости и аппроксимировать ее уравнением линейной регрессии (рис. 5).

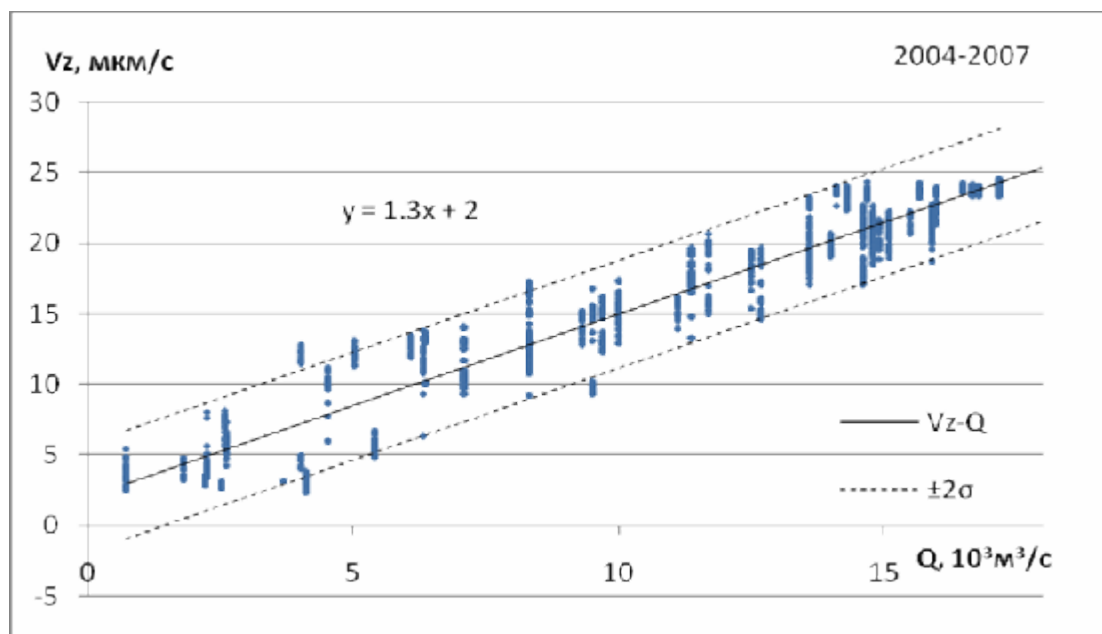


Рис. 5. Связи интенсивности микросейсм с расходами воды через ВСП

В период вне половодья происходят квазисинхронные изменения уровней воды НБ, мощности гидроагрегатов, интенсивности микросейсм в течение суток (рис. 6). Принимая, что максимальные и минимальные значения интенсивности микросейсм соответствуют аналогичным значениям мощности ГА, получена устойчивая связь между интенсивностью микросейсм и расходами воды через ГА (рис. 7).

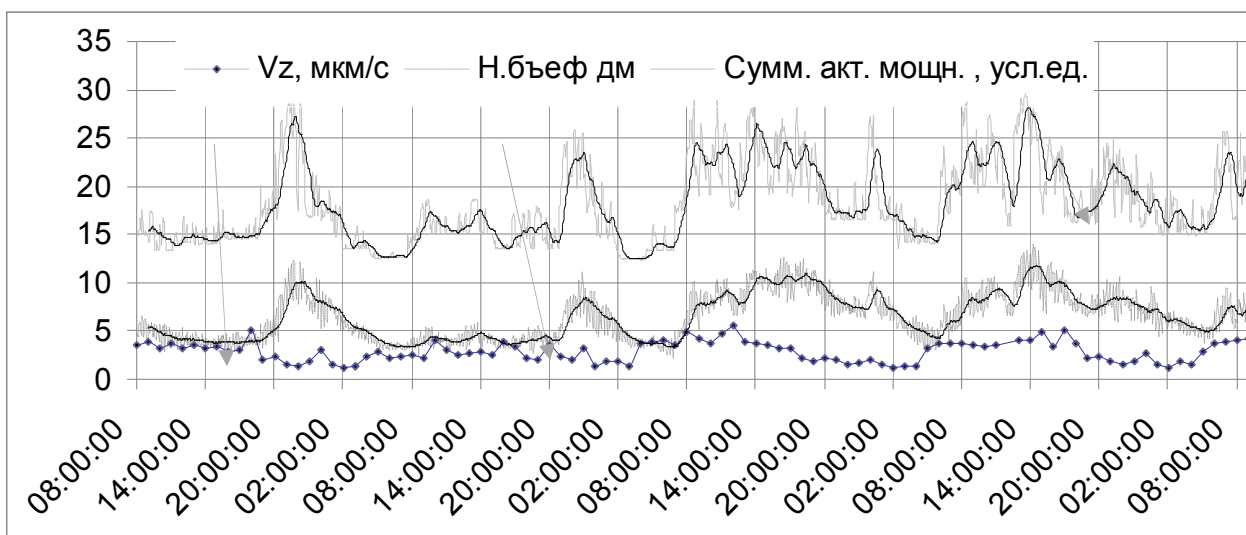


Рис. 6. Синхронная запись мощности, уровней НБ, интенсивности микросейсм (у.е. в связи с масштабированием)

Зависимость интенсивности микросейсм от мощности выработки электроэнергии представляется в виде линейной регрессии (рис. 7).

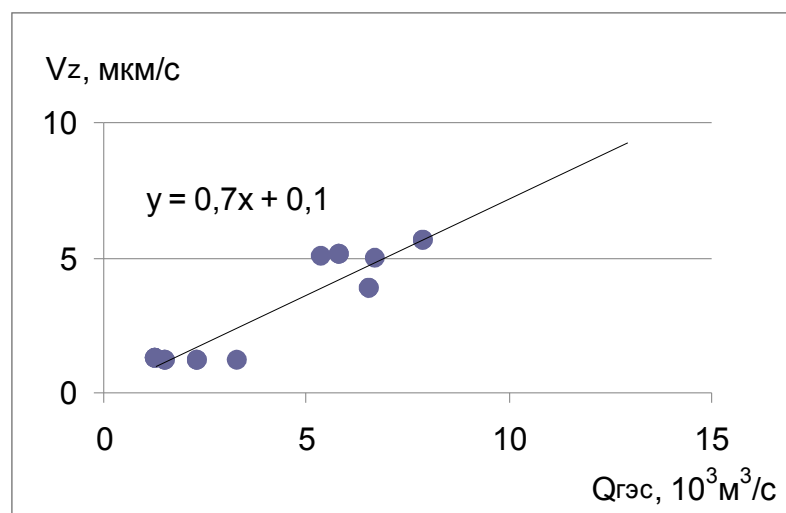


Рис. 7. Зависимость интенсивности вибраций от мощности попусков

Особенностью Жигулевской ГЭС является большой радиус вибрационного воздействия. Резонансные колебания зданий на частотах, соответствующих частотному диапазону генерируемых ВСП волн, прослеживаются на расстоянии порядка 5-7 км от ВСП. В относительно новых домах имеются множественные разрушения строительных конструкций: в 200 из 320. Для типовых крупнопанельных зданий серии 121-Т характерны трещины в ограждающих самонесущих панелях: X-образные, косые, идущие от углов дверных и оконных проемов (50 зданий (рис.8)), для длиномерных зданий серии 121-Т и других различной этажности характерны деформации оснований (более 10 зданий). Для кирпичных домов характерно разрушения кирпичной кладки на углах зданий и торцах лоджий (18 зданий). 44 дома имеют

разрушения консольных деталей. Встречаются трещины в стенах, разрушение цокольной части и фундаментов и т.д. Практически не поддаются подсчету трещины в местах примыканий и нарушения в герметизации межпанельных стыков. В системах водоснабжения и водоотведения зданий наблюдается ускоренный износ (трещины в чугунных стояках канализации). Статистика разрушений подчеркивает, что речь идет не о случайности, а о закономерности. Количество разрушений постоянно увеличивается. Обычные способы текущего и капитального ремонта различных разрушений неэффективны в этом районе. По мере удаления от плотины количество разрушений резко убывает. Разрушения характерного для сейсмической нагрузки вида могут возникать от слабых, но продолжительных динамических нагрузок, аналогичную нагрузку создает вибрационное воздействие ВСП ГЭС в период пропуска половодья – фактор, неисследованный ранее, влияющий как на комфортность проживания, так и, судя по характеру разрушений, и на состояние сооружений береговой зоны.

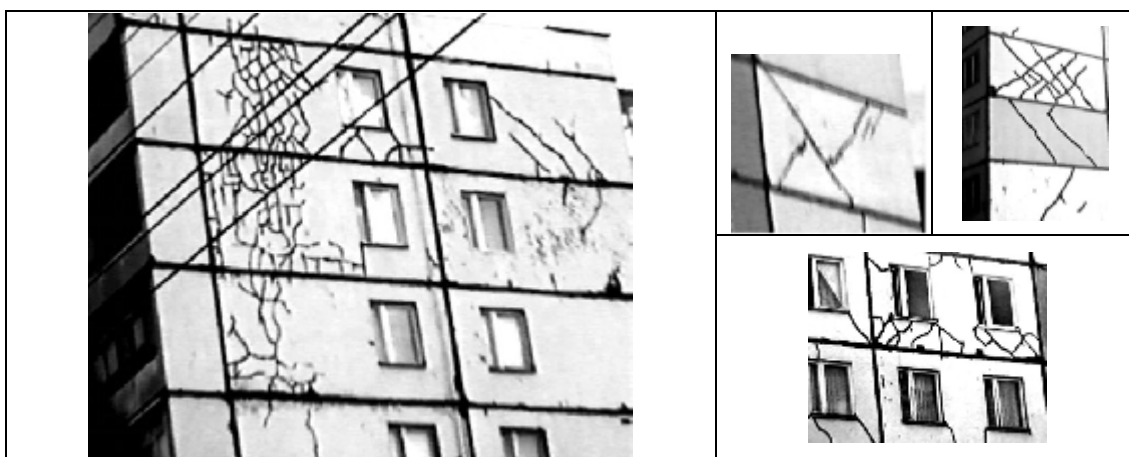


Рис. 8. Характерный вид трещин в панелях домов

При этом на фоне высокочастотных вибраций грунтов и сооружений проявляются «биения» с периодами до 12-15 минут, соответствующими периоду одной из мощных волновых составляющих в водной среде.

Хотя вибрации ГЭС являются относительно слабыми, но их постоянное многолетнее воздействие определяет новую и практически неизученную ситуацию, последствия которой в настоящее время трудно предсказать.

На фоне воздействия вибраций ГЭС возможна аномальная реакция грунтов на кратковременное действие высокочастотной динамической нагрузки, источником которой может являться транспорт, различные механизмы.

В зоне интенсивного влияния гидроузла уже ведется строительство микрорайона на искусственно создаваемой территории.

Выводы. Пропуски через гидроузлы сопровождаются сложным полимодальным длинноволновым процессом, захватывающим не только водную среду, но и значительную часть прибрежной зоны. Длинноволновые

процессы проявляются на расстоянии более 10 км вверх и вниз по течению от гидроузла, сопровождаются возникновением течений как направленного, так и возвратно–поступательного характера, приводящих к размыву берегов и берегозащитных сооружений. В грунтах попуски сопровождаются прохождением длинных упругих волн, которые связаны как с процессами в водной среде, так и с работой непосредственно гидроагрегатов. При этом возникают резонансные колебания объектов на собственных частотах. Все процессы обостряются в период пропуска половодья, когда увеличивается интенсивность и дальность распространения длинноволновых возмущений, как в водной среде, так и в грунтах, слагающих берега. При взаимодействии волн попуска с дном в нижнем бьефе проявляются низкочастотные колебания уровня воды малой амплитуды, которые индуцируют низкочастотные колебания скорости течений, превышающие сдвигающие значения скоростей для материала, слагающего береговые откосы. Также эти течения способствуют увеличению фильтрации в береговой откос, что в свою очередь, существенно понижает его устойчивость. Этот процесс является инерционным и осуществляется путем постепенной делатации грунта, что приводит к эффекту, «внезапного обрушения» откоса даже при не очень больших амплитудах колебаний уровня воды, при этом интенсивность береговых деформаций пропорциональна энергии попуска, т.е. непосредственно связана с работой ГЭС. Следовательно, при изучении процессов деформации берегов и дна водохранилищ необходимо опираться на результаты анализа процессов, причиной которых служат длинные волны (инфразгравитационные, ИГ - волны). Степень воздействия ИГ - волн на дно и берега определяется формой и особенностями последних, то есть взаимодействие имеет региональные черты, и изучение и оценка вклада ИГ - волн должна проводиться на основе натурных наблюдений. Таким образом, при работе гидроагрегатов ГЭС связанные с попусками ИГ-волны при взаимодействии с руслом в его мелководной части приводят к возникновению значительных придонных скоростей, превышающих критические размывающие для свойственного данной территории типа грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дебольский В.К., Ещенко Л.А, Котляков А.В. и др. Гидродинамические характеристики волн попуска в нижнем бьефе ГЭС и переформирование берегов. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2000, Т.27, №3 С. 286-291.
2. Дебольский В.К., Ещенко Л.А., Долгополова Е.Н., Котляков А.В. и др. Энергетические характеристики воздействия неустановившегося течения на русловые и береговые деформации и возникновение вторичных загрязнений потока из донных отложений. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2000, Т.30, №1, с. 49-54.
3. Дебольский В.К., Ещенко Л.А., Долгополова Е.Н., Котляков А.В. и др. Динамика течений в нижнем бьефе Рыбинского гидроузла и ее экологическая оценка. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2005, Т.32, №3 С. 274-281.
4. Шумакова Е.М., Котляков А.В, Артемьев С.А.. Деформации береговой зоны в районе г. Тольятти и их связь с режимом работы Жигулевской ГЭС.

«Водные ресурсы». М., 2007. т.34, №6, с.539-547.

5. Шумакова Е.М., Котляков А.В. Оценка опасности разрушений, вызванных микросейсмическими колебаниями грунтов на берегах р.Волга в районе г.Тольятти. Тр. 4 н.-пр. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», МЧС, Антистихия, М., 2004.