

## ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА РЕКИ КАМЫ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕГЛАМЕНТАЦИИ ДОБЫЧИ НЕРУДНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРЕДЕЛАХ НИЖНЕГО БЬЕФА КАМСКОЙ ГЭС

© 2018 г. Д.И. Перепелица<sup>1</sup>, А.П. Лепихин<sup>1,2,3</sup>, С.А. Лепешкин<sup>2</sup>,  
А.А. Тиунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

**Ключевые слова:** деформации русла, нижний бьеф, нерудные строительные материалы, гидродинамическая модель, Камская ГЭС, Воткинское водохранилище, Воткинская ГЭС.



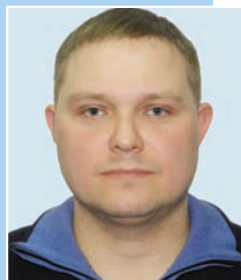
Д.И. Перепелица



А.П. Лепихин



С.А. Лепешкин



А.А. Тиунов

Рассмотрены вопросы регламентации добычи нерудных строительных материалов в нижних бьефах крупных ГЭС. Данная проблема особенно актуальна, когда крупный город располагается в нижнем бьефе ГЭС, и процесс добычи нерудных строительных материалов накладывается на сложную ситуацию взаимодействия водопользователей. В статье использована методика взаимного наложения батиметрических съемок за предыдущие периоды, совмещенные с анализом задекларированных объемов добычи нерудных строительных материалов. Создана имитационная гидродинамическая модель Воткинского водохранилища с учетом данных по фракционному составу донных отложений, при раз-

работке модели использовались программные продукты HEC-RAS v.4.1 и SMS v.11.1. Применение одномерных и двухмерных моделей позволило упростить расчеты без существенных потерь точности. На основании данных моделей выполнен просчет деформаций русла при стандартных условиях гидрологического режима Камского и Воткинского водохранилищ.

Представлены рекомендации по выделению участков в нижнем бьефе Камской ГЭС, на которых добыча нерудных строительных материалов не рекомендована, возможна при соблюдении ряда условий и ограничений по объемам и участки, где добыча возможна без ограничений.

Добыча нерудных строительных материалов (НСМ) – песка, гравия, песчано-гравийной смеси – необходима для нормального функционирования строительной отрасли: чем крупнее населенный пункт, тем больше объемы добычи НСМ для строительных предприятий. Многие месторождения НСМ приурочены к пойме или руслу водных объектов. Одной из особенностей их добычи является прямая зависимость радиуса доставки и стоимости продукта, поэтому все добывающие предприятия пытаются получить лицензии на добычу как можно ближе к потребителю. Зачастую интересы организаций, занимающихся добычей НСМ вблизи водных объектов, вступают в противоречия с интересами других водопользователей, поэтому вопрос регламентации добычи НСМ весьма актуален. При этом важнейшими при регламентации являются экологические, гидрологические аспекты, которые в значительной мере проявляются через деформации русла [1–3]. Оценка деформаций русла сама по себе достаточно сложна, а когда на естественные процессы деформаций накладываются антропогенные факторы, задача заметно усложняется.

Оценка деформаций русла нижнего бьефа крупных ГЭС является одной из важнейших задач гидрологии. Поскольку гидроэлектростанции размещали в хорошо освоенных районах, прибрежные территории нижних бьефов крупных ГЭС, как правило, плотно застроены жилыми и промышленными зданиями, в русле обустроены уже существующие водозаборы, в прибрежной зоне – территории рекреации, развито судоходство. Сама оценка и прогноз деформаций русла осложняются нестабильностью во времени и объемах попусков ГЭС, «осветлением» воды и, соответственно, высокой транспортирующей способностью сбрасываемой ГЭС воды. Береговую линию на таких участках часто пытаются защитить от размыва инженерными мероприятиями – организацией берегозащиты. Если при этом в русле в зоне нижнего бьефа велась или ведется активная добыча нерудных строительных материалов, возникает ряд дополнительных осложняющих факторов, которые необходимо учитывать в оценке русловых деформаций.

В настоящее время для оценки гидрологических последствий крупномасштабной добычи НСМ широко используются расчетные методы. Их общий обзор представлен в [4], в работе [5, 6] рассмотрены модели в 1-D и 2-D приближении, а в [7] поставлена и решена задача развития подводного карьера в 3-D приближении. К сожалению, отсутствие унифицированных методов расчетов осложняет процедуру согласования интересов водопользователей в нижнем бьефе и интересов энергетиков, эксплуатирующих ГЭС.

Нижний бьеф Камской ГЭС – убедительный пример сложной ситуации, возникающей при регламентации добычи НСМ с учетом интересов водопользователей (рис. 1).



Рис. 1. Общая схема нижнего бьефа Камской ГЭС.

В целом однозначных формализованных границ нижнего бьефа Камской ГЭС нет. Исходя из полученных в рамках проведенной работы фактических и эмпирических данных по режиму течений и уровней воды по всей длине Воткинского водохранилища (от створа Камской ГЭС до створа Воткинской ГЭС) на участке от Камской ГЭС до устья р. Сюзьвы, можно утверждать, что уровенный режим формируется преимущественно попусками Камской ГЭС, поэтому именно этот участок можно отнести к нижнему бьефу Камской ГЭС.

Цель данной работы – оценка деформации русла (определение вертикальных переформирований русла реки в результате добычи НСМ и естественного хода руслового процесса, а также получение количественных и качественных характеристик процессов переформирования ложа водоема) и разработка рекомендаций по добыче НСМ в нижнем бьефе Камской ГЭС.

В качестве основных инструментов анализа применяли метод сопоставления разновременных гидрографических съемок, описанный в [8], и имитационные гидродинамические модели [4–6]. В качестве исходных данных использованы следующие картографические материалы: лоцманская карта по фарватеру 1943 г. в масштабе 1:25 000; атлас единой глубоководной системы материалов съемок 1980–1982 и 1998 гг. в масштабе 1:25 000; результаты собственных гидрографических съемок за 2008 г. в масштабе 1:25 000; собственные гидрографические съемки за 2013 г. в масштабе 1:10 000.

Гидрографическая съемка русла р. Камы, представленная по лоцманской карте по фарватеру 1943 г., дает представление о рельефе дна водотока в речных условиях при отсутствии выраженного антропогенного влияния. Более поздние гидрографические съемки 1980, 1998, 2008, 2013 гг. отражают состояние рельефа водоема в различные периоды отработок запасов месторождений. В целом этот участок Воткинского водохранилища характеризуется высокой гидравлической активностью. Здесь отмечаются наибольшие скорости течения, а также значительная амплитуда колебаний уровней воды. Такие гидродинамические условия обуславливают преобладание процессов размыва над процессами аккумуляции. Большая доля отрицательных переформирований связана с антропогенной деятельностью по углублению судового хода и разработкой карьеров НСМ. В приурезовой части водоема местами отмечаются положительные подвижки, связанные с размывом берега и переложением слагающего его материала в приурезовой части. Наибольшие понижения рельефа дна закономерно соответствуют местам расположения месторождений.

Следует отметить, что на момент съемок 1938–1943 гг., приведенных к уровню 97 % обеспеченности, повсеместно обнажены песчаные пляжи и побочни шириной от нескольких десятков до сотни метров. К большей части перекаатов приурочены все ныне разрабатываемые и разведанные месторождения НСМ. Геологоразведочные работы с целью оценки запасов НСМ начались в 1955 г. (на Закамском месторождении в районе Верхне-Гамовского, Нижнее-Гамовского и Дворецкого перекаатов) и идут по настоящее время (изыскательские работы 2013 г. на месторождении Оборинское-1 в районе переката Оборинский осередок).

До создания плотин Камской и Воткинской ГЭС, в условиях незарегулированного русла, по русловой съемке по фарватеру 1943 г. р. Кама в пределах рассматриваемого участка развивалась по схеме свободного меандрирования и ограниченного меандрирования с элементами побочневого и ленточно-грядового режимов. Участок реки имел две четко выраженные излучины (от пос. Январский до пос. Крымский и от д. Дворцовая Слудка до пос. Усть-Качка) в начальной стадии формирования с углом разворота

до 75–120°. Данные макроформы русла сохранились и в настоящее время, плановые деформации вогнутого правого берега второй излучины ограничены в результате проведения мероприятий по укреплению набережной г. Краснокамска, строительством в пределах города причальных стенок грузовых портов.

С целью объективной оценки возможных фактических масштабов перестроений ложа водохранилища на рассматриваемом участке проведен анализ изменения морфометрии русла за пятилетний период. Для этого проанализированы изменения морфометрии русла как по отдельным створам, так и в целом по рассматриваемому участку. Для получения интегральных оценок с применением современных ГИС-технологий оценено изменение в целом объема русла р. Камы (Воткинского водохранилища) на рассматриваемом участке (КамГЭС – устье р. Сюзвы ниже г. Краснокамска) за исследуемый период, а также учтены проведенные ранее исследования в рамках разработки проекта НДВ для р. Камы в пределах Пермско-Краснокамского промузла.

Результаты расчетов отражены в табл. 1, 2. Как следует из представленных данных, увеличение объема ложа водохранилища за период 2008–2013 гг. составляет 8 млн м<sup>3</sup>, а средняя глубина увеличилась с 7,1 до 7,3 м.

**Таблица 1.** Изменение площадей водного сечения в створах Воткинского водохранилища на участке Пермско-Краснокамского промузла от КамГЭС до устья р. Сюзвы при проектном уровне воды 89,0 м БС

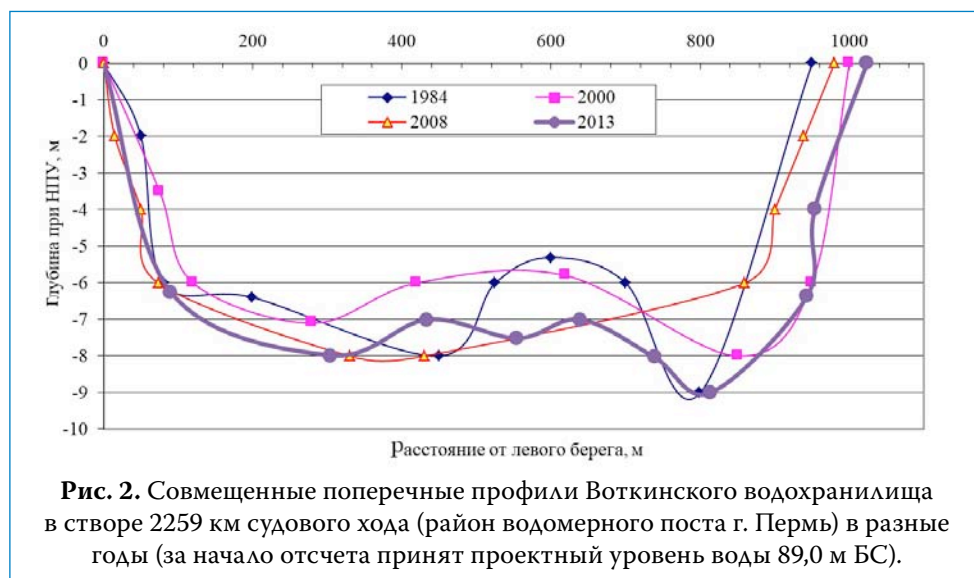
Год	Створ 2268 км судового хода		Створ 2259 км судового хода		Створ 2233 км судового хода		Створ 2224 км судового хода	
	Площадь, м <sup>2</sup>	Изменение площади (прирост), %	Площадь, м <sup>2</sup>	Изменение площади (прирост), %	Площадь, м <sup>2</sup>	Изменение площади (прирост), %	Площадь, м <sup>2</sup>	Изменение площади (прирост), %
1984	4382	0	5653	0	4911	0	4894	0
2000	4043	-8	5927	5	5815	19	7492	53
2008	5251	20	6204	10	7406	51	9270	89
2013	5127	17	7034	24	8133	66	9411	92

**Таблица 2.** Основные морфометрические показатели Воткинского водохранилища на участке Пермско-Краснокамского промузла от КамГЭС до устья р. Сюзьвы при НПУ

Год	Объем, км <sup>3</sup>	$\Delta W$ прир., км <sup>3</sup>	Площадь, км <sup>2</sup>	Средняя глубина, м
1984*	0,320	–	54,5	5,9
2000**	0,379	0,059	60,5	6,3
2008	0,430	0,051	60,3	7,1
2013	0,438	0,008	59,5	7,3

*Примечание:* \* – дата публикации материалов съемок 1980–1982 гг.; \*\* – дата публикации материалов съемок 1998 г.

Естественно, изменение морфометрии русла происходит не только вследствие русловых работ, но и естественным путем в результате насыщения сбрасываемого в нижний бьеф Камской ГЭС «осветленного» потока. Необходимо подчеркнуть, что изменение морфометрических показателей неоднородно на протяжении рассматриваемого участка, что достаточно наглядно демонстрирует изменение морфометрии по отдельным створам (рис. 2).



Для оценки деформаций в целом на участке исследований использовались инструменты площадного анализа программного пакета ArcGIS, результаты анализа представлены на рис. 3.



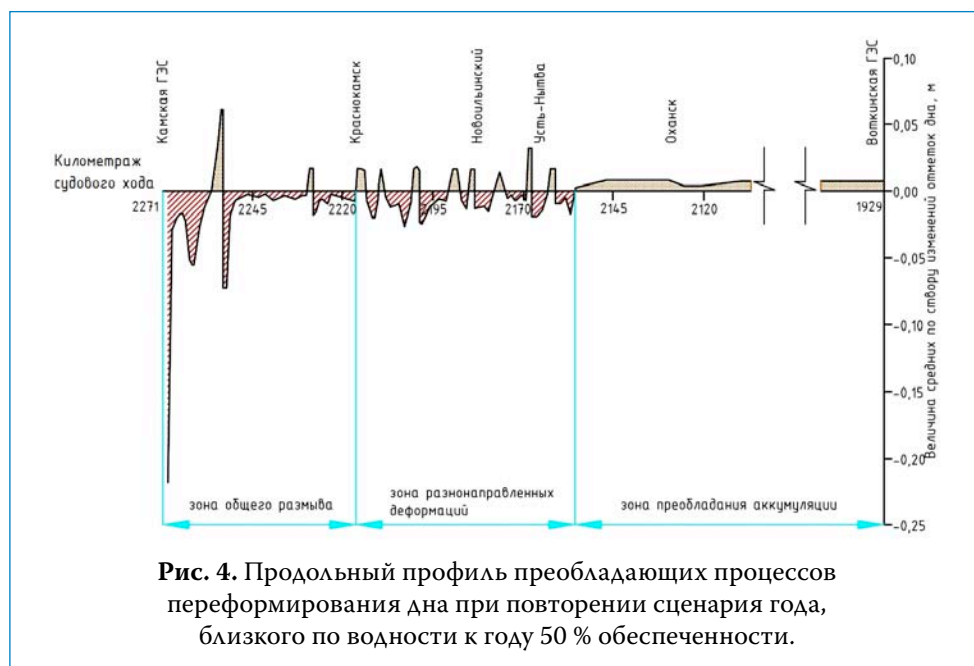


Рис. 3. Картограмма вертикальных переформирований дна.

На рис. 3 приведена картограмма вертикальных переформирований дна: отчетливо видны зоны, понижение отметок в пределах которых напрямую связано с добычей грунта. Такими являются участки ныне разрабатываемого Краснокамского месторождения (техногенное влияние), а также изменения, связанные с активизацией локальных размывов в границах отработки толщи Зеленихинского и Закамского месторождений (естественный ход руслового процесса). Данные особенности динамики морфометрии русла обусловлены, в первую очередь, особенностями размещения участков интенсивной добычи грунтов. Безусловно, сопоставление данных разновременных наблюдений недостаточно корректно, т. к. результаты измерений выполнены различными организациями и с разной степенью детальности. Тем не менее, в совокупности с анализом морфометрии по отдельным маркерным створам они однозначно указывают, что объемы добываемого грунта значительно больше декларируемых. В связи с этим представляется крайне актуальным усилить контроль за соблюдением лицензионных условий.

Для производства расчетов по оценке деформаций русла также был использован метод с применением одномерной гидродинамической модели HEC-RAS v.4.1 для первичной оценки [9] и двухмерной SMS v.11.1 – для итоговых расчетов [10].

Для оценки естественного хода руслового процесса при условии отсутствия какой-либо антропогенной нагрузки на ложе водоема принят сценарий года, близкого по водности к году 50 % обеспеченности. Результаты расчетов по моделям представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Продольный профиль преобладающих процессов переформирования дна при повторении сценария года, близкого по водности к году 50 % обеспеченности.

Из расчетных сценариев удален километровый участок, примыкающий непосредственно к ГЭС, поскольку из-за его специфичности он недостаточно корректно описывается гидродинамическими моделями HEC RAS v. 4.1 и SMS v.11.1.

Как представлено на рис. 4, зона общего размыва расположена непосредственно ниже Камской ГЭС и имеет протяженность 50 км (участок 285–335 км от плотины Воткинской ГЭС). Это связано с более высокими скоростями потока в данной части водохранилища. В пределах участка 220–285 км переформирования дна носят разнонаправленный характер, зоны размыва, где поток насыщается наносами, сменяются зонами аккумуляции. Зона преобладания аккумуляции расположена в нижней части водохранилища на участке до 220 км от плотины Воткинской ГЭС.

Регулирование стока воды и наносов Камской ГЭС также обусловило развитие глубинной эрозии, которая идет неравномерно по длине нижнего бьефа. Наибольшие размывы дна приурочены к приплотинному участку, где среднее понижение дна превышает 1,2 м.



## ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования разработана картосхема динамики русловых деформаций для нижнего бьефа Камской ГЭС с выделением зон активного устойчивого размыва и аккумуляции русла.

Решение вопроса о целесообразности добычи НСМ на том или ином участке нижнего бьефа должно приниматься, прежде всего, исходя из того, к какой зоне относится рассматриваемый участок. Активная добыча НСМ может вестись только в зонах аккумуляции, где она не только возможна, но и необходима для обеспечения устойчивого водопользования. В зонах размыва какую-либо добычу нерудных строительных материалов необходимо запретить. В устойчивых зонах этот вопрос должен решаться в зависимости от оценки возможных экологических и гидравлических последствий. Следует также отметить, что на протяжении всего нижнего бьефа Камской ГЭС увеличиваются площади поперечного сечения русла, в связи с чем происходит понижение кривой свободной поверхности потока, что также является важной характеристикой для регламентации добычи НСМ и обеспечения устойчивого водопользования.

Как известно, нижние бьефы крупных гидроузлов характеризуются значительными индивидуальными особенностями, поэтому не может быть общих рекомендаций по установлению, выделению участков добычи НСМ. Такие решения должны приниматься на основе сопряжения материалов мониторинговых наблюдений за достаточно длительный период и вычислительных экспериментов с использованием современных программных средств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jaglan M.S., Chaudhary B.S. Geo-Environmental Consequences of River Sand and Stone Mining: A Case Study of Narnaul Block, Haryana // Trans. Inst. Indian Geographers. Vol. 36. No. 2, 2014. P. 219–240.
2. Gavriletea M.D. Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market // Sustainability 2017. No. 9. P. 2–26; DOI:10.3390/su9071118.
3. Kowalska A.; Sobczyk W. Negative and Positive Effects of the Exploitation of Gravel-Sand. Inżynieria Miner. 2014. 15. P. 105–109.
4. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А., Перепелица Д.И. К проблеме оценки последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов на поверхностные водные объекты // Водное хозяйство России. 2014. № 3. С. 108–119.
5. Bovolín V., Ponce V. M. 2008. Internal report. San Diego St. Univ. 34.
6. Langer W. H. 2003. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-153.
7. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Ya.N. Numerical simulation of the dynamics evolution of alluvial mining quarries IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 879 (2017) 012019 p.1-6. DOI:10.1088/1742-6596/879/1/012019.

8. СТО ФГБУ ГГИ 52.08.31- 2012 Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров.
9. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W. Brunner, Version 4.1, January 2010.
10. Berger R.C., Tate J.N., Brown G.L., Savant G. User Manual for ADH Version 4.31, July 22, 2013.

**Сведения об авторах:**

Перепелица Дмитрий Ильич, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: perpelitsa\_di@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; профессор, кафедра гидрологии и охраны водных ресурсов, ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: lepihin49@mail.ru

Лепешкин Сергей Александрович, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; e-mail: aega@rambler.ru

Тиунов Алексей Александрович, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ведущий инженер-программист, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com