

Анализ пространственно-временных изменений рельефа дна Камского водохранилища

В. Г. Калинин¹, И. А. Беляева²✉

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Российская Федерация
(614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15)

²Камское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов,
Российская Федерация
(614015, г. Пермь, ул. 25-го Октября, 28а)

Аннотация: Цель – определение общей динамики и локальных особенностей процессов рельефообразования на центральном участке Камского водохранилища.

Материалы и методы. Исходными данными явились топографические карты, построенные до создания водохранилища, и результаты эхолотной съемки рельефа дна, выполненные в 1995, 2009 и 2012 годы. Предложен метод обеспечения сопоставимости материалов съемок за разные годы для проведения анализа произошедших изменений. Исследование пространственно-временной изменчивости формы ложа центрального участка Камского водохранилища выполнено на основе корректных цифровых моделей рельефа дна и поперечных профилей в среде ГИС.

Результаты и обсуждение. За период 1956–2012 годы выявлена общая тенденция сокращения объема исследуемого участка водохранилища. По поперечным профилям выявлены локальные деформации донного рельефа, выраженные в чередовании процессов аккумуляции и размыва как на левобережной и правобережной пойме, так и в старом русле реки Камы.

Выводы. Прирост отметок дна за 1956–2012 годы составил от 2,0 до 4,0 м, а объем исследуемого участка сократился на 19,56 %. Наибольшие объемы аккумуляции наносов зафиксированы в зоне старого затопленного русла реки Камы.

Ключевые слова: изменения рельефа дна, цифровая модель рельефа, повторные промеры глубин, водохранилище, осадконакопление.

Для цитирования: Калинин В. Г., Беляева И. А. Анализ пространственно-временных изменений рельефа дна Камского водохранилища // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 1, с. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/73-81>

ВВЕДЕНИЕ

При решении экологических, гидробиологических и общелимнологических задач, а также при определении характеристик будущих водохранилищ, их эксплуатации, реконструкции и восстановлении важную роль играет исследование рельефа дна и донных осадков водохранилищ [3].

В настоящее время существует проблема недостаточной изученности процессов переформирования рельефа дна аквальных геосистем водохранилищ, обусловленных развитием абразионно- и эрозионно-аккумулятивных явлений в составе морфолитогенеза ложа водоемов [15]. Также возникают затруднения при оценке изменений объемов водохранилищ в результате воздействия рельефообразующих факторов.

Формирование чаши искусственных водоемов находится в тесном взаимодействии с процессами обрушения берегов, поступлением стока взвешенных наносов, накоплением иловых отложений под воздействием

таких гидродинамических факторов как волнение, колебание уровней воды, течения и др. [2, 11].

Анализ публикаций позволил выделить следующие методы для изучения динамики рельефа дна: расчет объемов взвешенных частиц, поступающих с твердым стоком по рекам; оценка объема твердого материала, поступающего от переработки берегов самого водохранилища; отбор проб грунта дна и измерение слоя вторичных отложений; повторные промеры глубин.

Расчеты объемов взвешенных наносов, поступающих по боковым притокам в водохранилище, выполняют по материалам гидрометрических наблюдений над мутностью на замыкающих створах с введением различных поправочных коэффициентов. Здесь следует отметить исследования Р. Б. Тарвердиева [21], выполненные на Мингечаурском водохранилище, и Л. А. Кузнецовой [9] – на Камском.

Оценка объемов переработки берегов подразумевает проведение на ключевых стационарах детальной



топографической съемки и нивелирования. Эти работы широко распространены на большинстве водохранилищ. Так, на Рыбинском водохранилище выполнена оценка интенсивности переформирования отмелей с использованием нивелировок [4]. На камских водохранилищах в 1998-2008 годы проводился мониторинг экзогенных геологических процессов и их роли в формировании донных отложений [5, 12-14].

Одним из самых информативных методов изучения переработки берегов и расчета скорости их размыва являлся метод совмещения разновременных аэрофотоснимков масштаба 1:10000-1:15000. Н. Н. Назаровым [12] по данным дешифрирования аэрофотоснимков были определены объемы процессов берегообрушения на различных участках Воткинского водохранилища и скорость размыва берегов в зависимости от их геологического строения.

При отборе проб грунта дна выполняются измерения толщины слоев донных отложений в колонке. И. А. Печеркиным [19] на основе анализа этих данных составлена схема типов отложений разного генезиса. Л. А. Кузнецовой [9] в расчетах заиления Камского водохранилища дополнительно определялось содержание органического вещества в донных отложениях на основе данных измерений объемных весов последних. В. В. Законновым [3] по результатам грунтовых съемок проанализированы условия формирования донных отложений на Волжских водохранилищах, рассчитаны темпы аккумуляции твердых частиц в чаше водохранилищ, а также содержание в них биогенных элементов. Аналогичные исследования выполнены П. С. Лопухом [10] на водохранилищах Белоруссии. Им выделены две стадии формирования их ложа: занесения и заиления. Выявлено, что устойчивая структура грунтовых комплексов формируется к 15-18 году эксплуатации водохранилища, после чего начинается стадия заиления.

Применение метода оценки результатов разновременных съемок глубин позволяет детально исследовать процессы переформирования рельефа дна и оценить динамику осадконакопления на значительных по площади участках водохранилища.

Первая попытка сопоставления результатов разновременных съемок была сделана И. А. Печеркиным [18] на Камском водохранилище в районе участка Висим. Так, через 10 лет после наполнения водоема им зафиксированы процессы как аккумуляции, так и размыва положительных форм рельефа дна. Данные процессы наиболее характерны для участков глубиной до 4,0-5,0 м от НПУ в районах с активной ветровой деятельностью. При этом в широких участках водохранилища отмечена высокая скорость разрушения островов.

Применение ГИС-технологий дает возможность на более высоком качественном уровне исследовать пространственно-временные деформации рельефа дна водохранилищ. В работах [6, 7] выполнены исследования по созданию сопоставимых цифровых моделей рельефа (ЦМР) дна и предложен метод проведения сравнительного анализа материалов повторных съемок за разные годы.

Цель настоящей работы – определение общей динамики и локальных особенностей процессов рельефообразования на центральном участке Камского водохранилища.

Анализируемый участок водохранилища (рис. 1) представляет собой озеровидное расширение. Старое затопленное русло реки Камы расположено по центру участка, а ближе к его южной границе – у левого берега. Морфометрические характеристики: средняя глубина – 9,4 м, средняя ширина – 11,5 км. Левый берег отличается наибольшей извилистостью и высоким обрывистым подводным склоном. Правый берег на всем протяжении характеризуется небольшой высотой, пологостью с плавно увеличивающимися глубинами [17]. Сформировавшиеся геологоморфологические особенности участка способствуют развитию процессов осадконакопления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными явились результаты русловых съемок, проведенных в 1995, 2009 и 2012 годах, и топографические карты 1931-1932 годов масштаба 1:10000, 1:25000 (высота сечения рельефа 1 м), построенные Ленинградским отделением «Гидроэлектропроект», использованные для определения характеристик донного рельефа Камского водохранилища на момент его заполнения (1956 г.). Пространственно-временные изменения рельефа дна, а именно их качественные и количественные параметры, рассчитывались при сопоставлении разновременных ЦМР.

Здесь важно отметить ряд особенностей, которые необходимо учитывать для того, чтобы избежать возможных ошибок. Так, результаты более ранних промеров, выполненные на бумажном носителе необходимо преобразовать в цифровой формат путем сканирования с разрешением не менее 300 dpi, сшивки и трансформации изображений.

Для корректного анализа данных промеров глубин за разные годы В. Г. Калининым и Д. Н. Гайнуллиной [6] разработан метод их предварительной подготовки, который включает в себя: географическую привязку; создание отдельных картографических слоев участков водохранилища с заполненной атрибутивной базой данных (АБД); приведение всех значений глубин к НПУ с вычислением их абсолютных высот; применение одних и тех же интерполяционных методов; обеспечение соответствия количества и местоположения промерных точек. Последнее условие является наиболее важным для обеспечения высокого качества определения морфометрических характеристик участков водохранилищ.

Ранее [20] доказано, что если для построения ЦМР дна использовать разные по детальности данные промеров глубин (например, исходные карты эхолотной съемки и созданный на их основе «Атлас единой глубоководной системы ...» [1], в котором сильно генерализовано количество точек глубин), то при определении объемов исследуемого участка возникают ошибки, которые могут достигать 20 % и более при разных уровнях

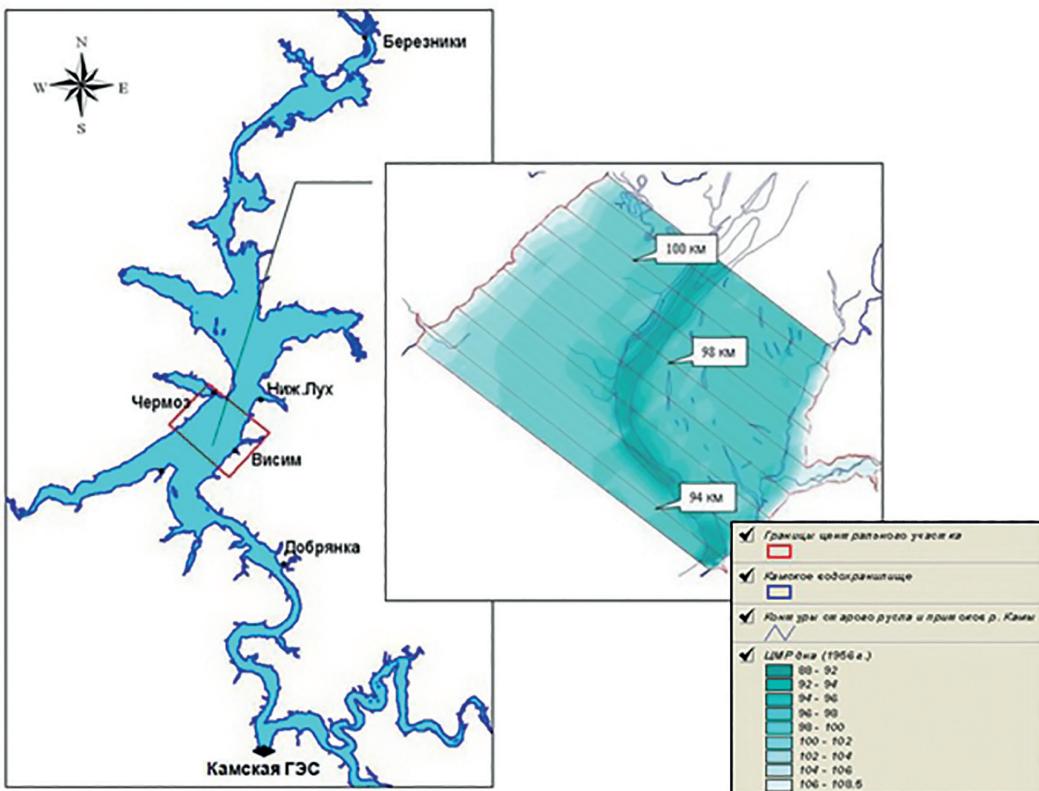


Рис. 1. Местоположение исследуемого участка Камского водохранилища.

На врезке показаны: цифровая модель рельефа дна; положение старого русла реки Камы; поперечные профили, построенные через 1 км. Цифрами отмечено расстояние от плотины Камской ГЭС [Fig. 1. Location of the study area of the Kama Reservoir. The inset shows: a digital model of the bottom relief; position of the old river bed Kama; transverse profiles constructed at 1 km intervals. The numbers indicate the distance from the Kama Hydroelectric Power Station dam]

нях воды. Поэтому важным условием создания корректных ЦМР дна является соответствие количества и местоположения промерных точек.

Для построения таких ЦМР дна предложен следующий методический подход [8]. При исследовании произошедших изменений рельефа дна участка водохранилища, например, за 1956-1995 годы в программном комплексе ArcGIS строится ЦМР по слою за 1956 год (с наиболее подробными исходными данными). Затем создается шаблон на основе точечного векторного слоя за 1995 год, в АБД которого обнуляются значения глубин и абсолютных высот. После чего средствами ArcGIS из ЦМР за 1956 год «извлекаются» отметки высот, соответствующие точкам нового векторного слоя, и помещаются в его атрибутивную базу данных. В результате получаем два векторных слоя с полным соответствием количества и местоположения точек, а также заполненной АБД за разные годы (рис. 2 а, б).

По ним строятся две ЦМР дна с точным совпадением ячеек этих растров (рис. 2 в, г), что дает возможность корректно смоделировать пространственно-временные изменения рельефа дна.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ произошедших изменений донного рельефа для центрального участка Камского водохранилища выполнен за следующие промежутки времени: 1956-

1995 годы (рис. 3 а, б, в), 1995-2009 годы (рис. 3 г, д, е), 2009-2012 годы (рис. 3 ж, з, и). Согласно [16], точность выполнения промерных работ при глубинах до 10 м составляет 0,1 м, от 10 до 20 м – 0,2 м. Поэтому изменения рельефа дна от -0,2 до 0,2 м находятся в пределах точности измерений. На шкале глубин этот диапазон окрашен белым цветом.

В подводном рельефе анализируемого участка Камского водохранилища выделено 3 морфологические зоны: старое русло, пойма, надпойменная терраса.

По результатам сопоставления материалов промеров глубин за 1956-1995 годы выявлено, что наибольшие величины аккумуляции наносов (до 3,5 м) отмечались вдоль старого русла реки Камы (см. рис. 3 в). Это связано с тем, что под действием волнения, течений и колебания уровня воды материал экзогенной переработки береговых склонов транспортируется в направлении старого русла. Увеличению объемов аккумуляции наносов и замедлению проточных течений способствуют положительные формы рельефа (бывшие острова) в старом русле реки Камы. Как отмечалось в работе [15], именно в зоне затопленного русла отмечается образование наибольших мощностей иловых отложений.

В зоне правобережной поймы наблюдалось увеличение количества донных отложений (на 1,0-2,0 м) в направлении старого русла реки Камы (см. рис. 3 в).

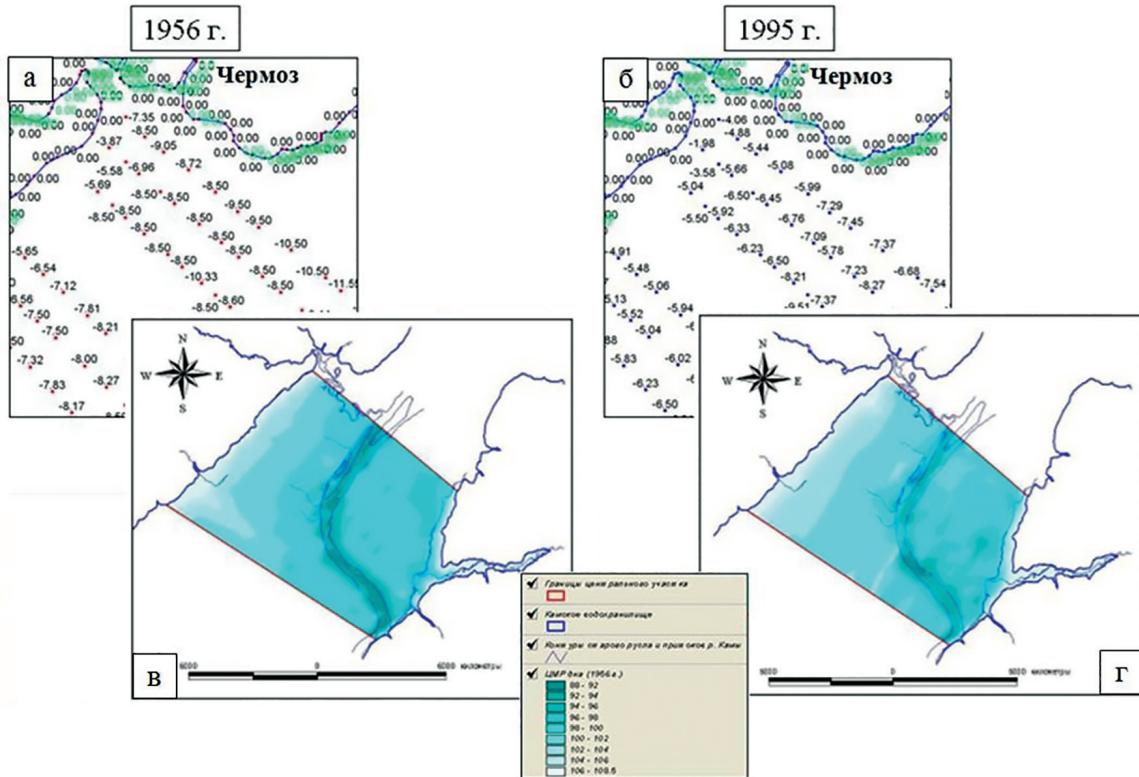


Рис. 2. Построение корректных ЦМР дна участка Камского водохранилища за 1956 и 1995 годы:

а, б – векторные слои с точным соответствием количества и местоположения промерных точек;

в, г – ЦМР дна с точным совпадением ячеек растра

[Fig. 2. Construction of correct DEMs of the bottom of the Kama Reservoir site for 1956 and 1995:

a, b – vector layers with an exact correspondence to the quantity and location of measuring points;

c, d – DEMs of the bottom with an exact match of raster cells]

В зоне левобережной поймы отмечено чередование процессов аккумуляции и размыва донных отложений. Для зоны надпойменных террас по левому и по правому берегам характерно чередование понижений и повышений рельефа дна (см. рис. 3 в).

На севере исследуемого участка процессы осадкоаккумуляции отличались неравномерностью: на расстоянии 2,0 км от берега прирост донных отложений составил 0,5 м, а на расстоянии 1,0 и 3,0 км – 2,0 м. Также, в результате выравнивания донного рельефа за исследуемый промежуток времени имело место локальное уменьшение (1,0-3,0 м) абсолютных отметок дна (см. рис. 3 в).

В южной части центрального участка водохранилища процессы седиментации находятся под влиянием эрозионной деятельности водотоков, впадающих с правого и левого берегов. Формирование стоковых ложбин отмечено в период глубокой зимней сработки (до 7,5 м) водохранилища. Уменьшение абсолютных отметок дна наиболее отчетливо наблюдается в старом русле реки Звериная, которая впадает со стороны правого берега.

В этой зоне величина размыва за 1956-1995 годы составила 1,0-2,0 м. Продукты размыва отложились в понижении рельефа на расстоянии 6,0 км от правого берега (см. рис. 3 в). Величина аккумуляции составила 3,5 м. В устьях притоков рек Большой Висим и Малый Висим накопление донных отложений достигло 2,5 м (см. рис. 3 в).

За период 1995-2009 годы максимальные значения аккумуляции наносов (до 4 м) также наблюдались в зоне старого русла реки Камы (см. рис. 3 е). Аккумуляция наносов в глубоководной зоне вызвана процессами волнового морфолитогенеза, проявляющегося в области озеровидного расширения водохранилища. Уменьшение абсолютных отметок дна до 1,5 м отмечалось в береговой зоне и на надпойменной террасе, что могло быть вызвано процессами абразии. Обрушенный материал под воздействием вдольбереговых течений, по-видимому, перемещался в зону поймы, где величина аккумуляции донных отложений составила в среднем 2,0 м.

В южной части участка на распределение донных отложений оказали влияние притоки, впадающие в водохранилище. Со стороны левого берега имели место небольшие эрозионные размывы в устьях рек. В то же время у правого берега отмечено занесение стоковой ложбины наносами. Это может быть связано с тем, что на затопленной пойме происходит увеличение мощности иловых отложений в отрицательных формах рельефа (см. рис. 3 е).

Период 2009-2012 годы очень короткий, поэтому если рассматривать произошедшие изменения в целом по участку, то видно, что на значительных пространствах они находились в пределах точности измерений ($\pm 0,2$ м) и в подавляющем большинстве не превышали

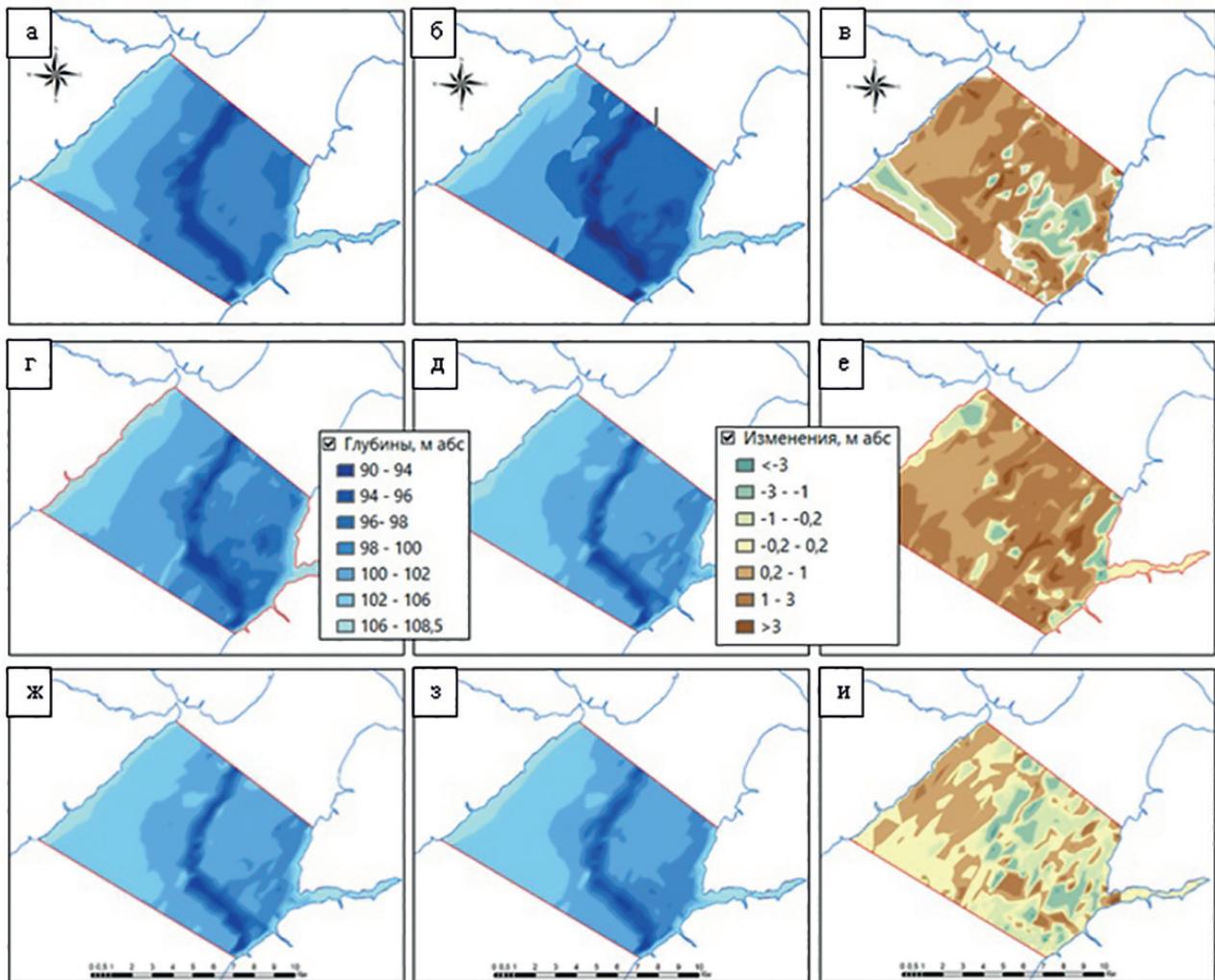


Рис. 3. ЦМР дна центрального участка Камского водохранилища за 1956 год (а), 1995 год (б, г), 2009 год (д, ж), 2012 год (з) и ЦМР изменений рельефа дна за периоды:

в) 1956-1995 годы, е) 1995-2009 годы, и) 2009-2012 годы

[Fig. 3. DEM of the bottom of the central part of the Kama reservoirs for 1956 (a), 1995 (б, г), 2009 (д, ж), 2012 (з) and DEM of changes in the bottom topography for the periods: в) 1956-1995, е) 1995-2009, и) 2009-2012]

$\pm 1,0$ м (см. рис. 3 и). Процессы аккумуляции (до 1,0 м) по-прежнему отмечены в зоне старого русла. При этом в остальной части русла наблюдалось незначительное понижение абсолютных отметок дна. Наибольшая аккумуляция (0,5-1,5 м) отмечена у правого берега в зоне надпойменной террасы. На правобережной пойме она не превышала 0,8 м.

Для зоны левобережной поймы и надпойменной террасы характерно чередование уменьшения и увеличения абсолютных отметок дна. В южной части исследуемого участка в зоне правобережной поймы отмечен размыв (0,5-1,0 м) вблизи склона старого русла (см. рис. 3 и).

Ранее Н.Н. Назаровым [15] при исследовании процессов осадконакопления в нижней части Воткинского водохранилища были получены подобные результаты. При сравнении отметок донной поверхности старого русла в районе сел Частые и Бабка за 1984-2000 годы выявлено, что на некоторых участках мощность нако-

пления вторичных отложений местами превышала 90 см под воздействием как абразионных, так и флювиальных процессов.

Изменение объемов исследуемого участка Камского водохранилища, вычисленных по ЦМР дна за разные годы, характеризует интенсивность процессов седиментации (табл. 1). Так, за период 1956-2009 годы наблюдалось существенное сокращение объемов участка, что свидетельствует о высоких темпах осадконакопления. Однако за период 2009-2012 годы имело место незначительное уменьшение абсолютных отметок дна.

Для верификации полученных результатов выполнено исследование изменений рельефа дна по трем поперечникам, расположенным в пределах исследуемого участка водохранилища на расстоянии 94, 98 и 100 км от плотины Камской ГЭС (см. рис. 1). Поперечные профили (рис. 4 а-и) построены на основе данных, полученных путем извлечения значений отметок дна из ЦМР в точке через 10 м по линиям профилей за периоды (1956-

Изменение объемов центрального участка Камского водохранилища

за рассматриваемые промежутки времени

[Table 1. Changes in the volumes of the central part of the Kama Reservoir over the periods of time under consideration]

Годы / Years	Средняя глубина, м / Average depth, m	Объем, км ³ / Volume, km ³	Изменение объемов, % / Change in volumes, %	
			По сравнению с 1956 годом / Compared to 1956	По сравнению с предыдущим годом / Compared to previous year
1956	8,69	0,787	—	—
1995	7,99	0,723	-8,09	-8,09
2009	6,93	0,627	-20,29	-13,28
2012	6,99	0,633	-19,56	0,93

1995, 1995-2009, 2009-2012 гг.). Использование такого подхода позволило с одной стороны подтвердить пространственно-временные закономерности изменений донного рельефа, выявленные по ЦМР, а с другой – обнаружить локальные деформации рельефа дна.

Так, например, понижения и повышения рельефа дна, отмеченные на левобережной пойме за 1956-1995 годы, выровнены за следующий временной промежуток (1995-2009 годы) в результате перераспределения наносов сложной системой течений. Однако на правобережной пойме за аналогичный период времени отмечено увеличение абсолютных отметок дна, что обусловлено поступлением продуктов берегообразования.

За период 1956-1995 годы на всех профилях исследуемого участка характерным является выравнивание рельефа на пойме, занесение и сужение старого русла реки Камы, что сложно выявить по ЦМР дна (см. рис. 4 а, г, ж). За 1995-2009 годы наблюдалось усиление процессов осадконакопления (см. рис. 4 б, д, з), а за период 2009-2012 годы – незначительное выравнивание донного рельефа на профилях 98 и 100 (см. рис. 4 в, е, и).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для выполнения детальных исследований пространственно-временной динамики подводного рельефа дна на разных участках водохранилища использован метод предварительной обработки исходных данных. Метод основан на построении двух ЦМР дна исследуемого участка водохранилища с одинаковой пространственной привязкой и точным совпадением ячеек растровой модели.

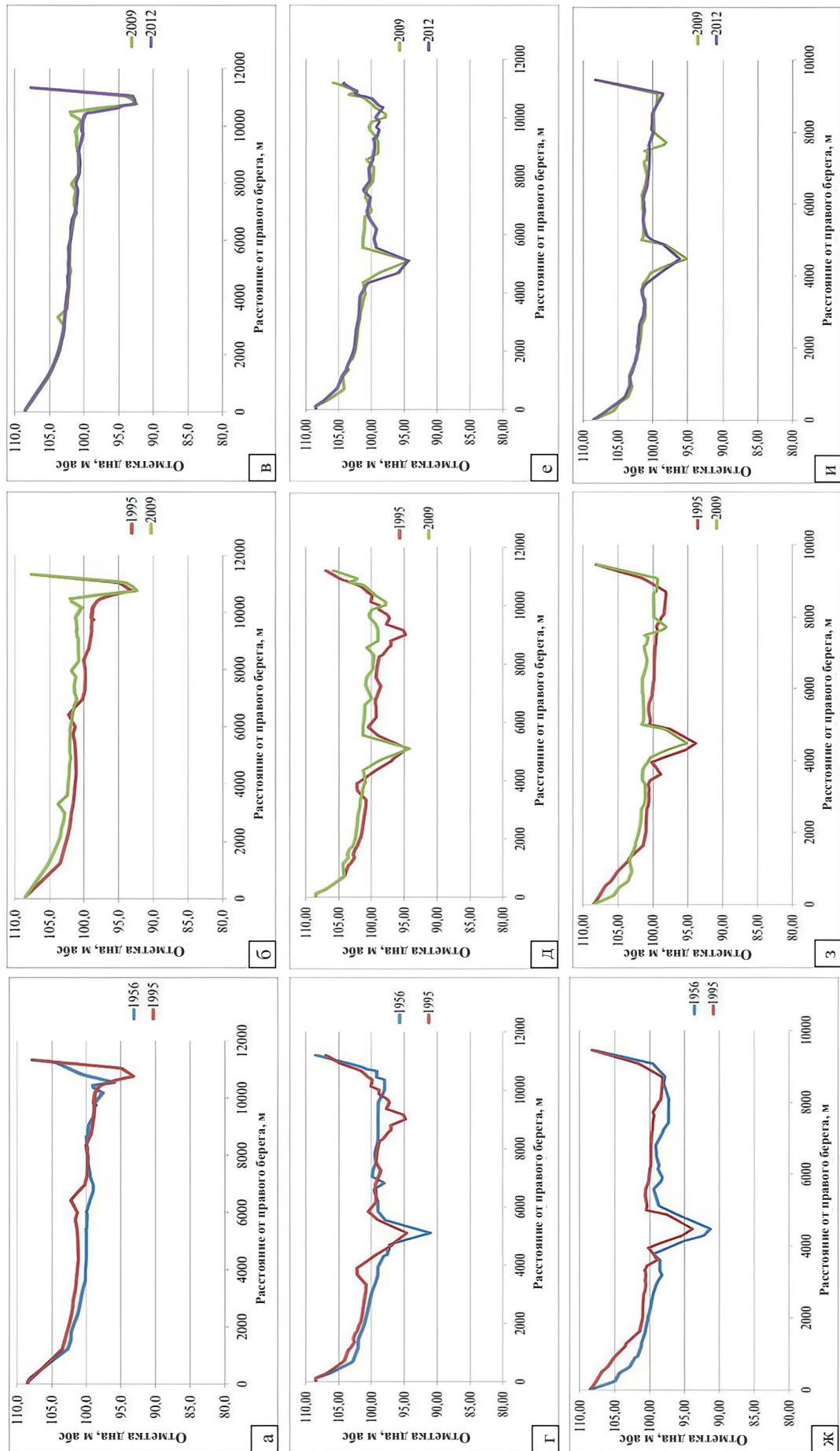
2. С помощью ЦМР дна за исследуемые промежутки времени удалось выявить следующие закономерности: в результате перемещения материалов берегообразования течениями основная доля наносов аккумулировалась в зоне старого русла. За период 1956-2009 годы прирост отметок дна составил до 4,0 м в направлении от берегов к старому руслу реки Камы. Объем исследуемого участка сократился на 20,29 % (0,16 км³). За период 2009-2012 годы преобладал процесс размыва, наибольшие значения которого локализованы в старом русле р. Камы. Объем исследуемого участка увеличился на 0,93 % (0,006 км³).

3. Анализ пространственно-временных деформаций рельефа дна по поперечным профилям позволил выявить локальные изменения донного рельефа и их пространственно-временную неоднородность, выраженные в чередовании процессов аккумуляции и размыва как на левобережной и правобережной пойме, так и в старом русле реки Камы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Река Кама от поселка Керчевский до города Чайковский. Санкт-Петербург: Издательство ОАО «Иван Федоров», 2000. 99 с.
2. Вендрев С. Л. Проблемы преобразования речных систем. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1970. 236 с.
3. Законов В. В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: дис... докт. географ. наук. Москва, 2007. 379 с.
4. Зиминова Н. А., Курдин В. П. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища // Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах, 1968, с. 56-71.
5. Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий / В. Г. Калинин, Н. Н. Назаров, С. В. Пьянков, С. А. Симирнов, Д. Г. Тюняткин // Геоморфология, 2004, вып. 4, с. 55-62.
6. Калинин В. Г., Гайнуллина Д. Н. Методические аспекты исследования пространственно-временной динамики рельефа дна долинных водохранилищ // Географический вестник, 2013, № 4 (27), с. 17-21.
7. Калинин В. Г., Гайнуллина Д. Н. Применение ГИС-технологий для исследования процессов формирования рельефа дна водохранилищ // Труды Международной научно-практической конференции в 2 томах. Том I: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами, 2015, с. 31-36.
8. Калинин В. Г., Ковязина И. А. К оценке осадконакопления на Камском водохранилище // Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 4 томах «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», 2017, т. 2, с. 95-100.
9. Кузнецова Л. А. Формирование донных отложений равнинных водохранилищ (на примере Камского водохранилища): дисс. ... канд. географ. наук. Пермь, 1981. 224 с.
10. Лопух П. С. Закономерности развития водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана. Мин: БГУ, 2000. 332 с.
11. Матарзин Ю. М. Гидрология водохранилищ. Пермь: Издательство ПГУ, ПСИ, ПССГК, 2003. 296 с.
12. Назаров Н. Н. Географическое изучение берегов и акваторий камских водохранилищ // Географический вестник, 2006, № 2, с. 18-36.
13. Назаров Н. Н. Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края. Пермь: Издательство ЗАО «Полиграфкомплект», 2008. 152 с.

Анализ пространственно-временных изменений рельефа дна Камского водохранилища



Puc. 4. Произошедшие изменения рельефа дна по поперечным профилям за исследуемые периоды на расстоянии 94 (а-в), 98 (г-е), 100 (ж-и) км от плотины Камской ГЭ
[Fig. 4. Occurred changes in the bottom relief along the cross-sectional profiles for the studied periods at a distance of 94 (a-c), 98 (d-e), 100 (g-i) km from the dam of the Kama SE]

14. Место и роль экзогенных процессов в формировании донных отложений Воткинского водохранилища / Н. Н. Назаров, В. М. Анисимов, В. Г. Калинин, С. А. Симиренов, Д. Г. Тюняткин, И. В. Фролова // *Вопросы физической географии и геоэкологии Урала*, 2000, с. 85-93.
15. Назаров Н.Н. Русловые процессы и морфолитогенез ложа водохранилищ // *Географический вестник*, 2009, № 1, с. 1-7.
16. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 7. Часть 1: Гидрологические наблюдения на озерах и водохранилищах*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1972. 261 с.
17. Перевощикова О. А., Калинин В. Г. К оценке пространственных неоднородностей рельефа дна долинных водохранилищ (на примере Камского) // *Географический вестник*, 2014, № 3 (30), с. 18-26.
18. Печеркин И. А. *Геодинамика побережий камских водохранилищ. Часть 2: Геологические процессы*. Пермь, 1969. 308 с.
19. Печеркин И.А. Формирование прибрежной отмели на Камском водохранилище // *Гидротехническое строительство*, 1959, № 12, с. 23-25.
20. Пьянков С. В., Калинин В. Г. *ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских)*: монография. Пермь: Издательство ООО «Алекс-Пресс», 2011. 158 с.
21. Тарвердиев Р. Б. Расчет стока наносов рек, впадающих в Мингечаурское водохранилище // *Комплексные исследования водохранилищ*, 1978, вып. 4, с. 87-94.
- Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 23.03.2024
Принята к публикации: 20.02.2025

UDC 556.555

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/73-81>

ISSN 1609-0683

Analysis of Spatial and Temporal Changes in the Bottom Relief of the Kama Reservoir

V. G. Kalinin¹, I. A. Belyaeva²✉

¹Perm State University, Russian Federation
(15, Bukirev Str., Perm, 614068)

²Kama Basin Water Administration of the Federal Agency of Water Resources, Russian Federation
(28a, 25th October Str., Perm, 614015)

Abstract. The purpose is to determine the general dynamics and local features of relief formation processes in the central part of the Kama Reservoir.

Materials and methods. The initial data were topographic maps constructed before the creation of the reservoir, and the results of echo sounding surveys of the bottom relief, carried out in 1995, 2009 and 2012. A method is proposed to ensure comparability of survey materials for different years to analyze the changes that have occurred. The study of spatio-temporal variability in the shape of the bottom of the central part of the Kama Reservoir based on the correct digital models of the bottom relief and transverse profiles in ArcGIS were carried out.

Results and discussion. General trend towards a reduction in the volume of the central part of the reservoir was revealed over the period 1956-2012. The transverse profiles revealed local deformations of the bottom relief, expressed in the alternation of accumulation and erosion processes both on the left and right floodplains, and in the old Kama River bed.

Conclusions. The increase in bottom elevations for the period 1956-2012 ranged from 2.0 to 4.0 m, and the volume of the study area decreased by 19,56 %. The largest volumes of sediment accumulation were recorded in the area of the old Kama River bed.

Key words: changes in bottom relief, digital elevation model, repeated depth measurements, reservoir, sedimentation.

For citation: Kalinin V. G., Belyaeva I. A. Analysis of Spatial and Temporal Changes in the Bottom Relief of the Kama Reservoir. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografi a. Geoekologiya*, 2025, № 1, p. 73-81. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/73-81>

REFERENCES

1. *Atlas edinoy glubokovodnoy sistemy Evropeyskoy chasti RF. Reka Kama ot poselka Kerchevskiy do goroda Chaykovskiy* [Atlas of the unified deep-water system of the European part of the Russian Federation. The Kama River from the Kerchevsky settlement to the city of Tchaikovsky]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo OAO «Ivan Fedorov», 2000. 99 p. (In Russ.)
2. Vendrov S. L. *Problemy preobrazovaniya rechnykh system* [Problems of river systems transformation]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 236 p. (In Russ.)
3. Zakonov V. V. *Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada* [Sedimentation in the Volga Cascade Reservoirs]: dis... dokt. geograf. nauk. Moscow, 2007. 379 p. (In Russ.)



4. Ziminova N.A., Kурдин В.П. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища [Formation of relief and soils of shallow waters of the Rybinsk reservoir]. *Biologicheskie i гидрологические факторы местных пересечений рыб в водохранилищах*, 1968, pp. 56-71. (In Russ.)
5. Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий [Study of landslide activity on the banks of the Kama reservoir using GIS-technologies] / В.Г. Калинин, Н.Н. Назаров, С.В. П'янков, С.А. Симиренов, Д.Г. Туняталин. *Геоморфология*, 2004, v. 4, p. 55-62. (In Russ.)
6. Калинин В.Г., Гайнуллина Д.Н. Методические аспекты исследования пространственно-временной динамики рельефа dna долинных водохранилищ [Methodical aspects of research of spatial and temporal dynamics of valley reservoir bottom topography]. *Географический вестник*, 2013, no. 4 (27), pp. 17-21. (In Russ.)
7. Калинин В.Г., Гайнуллина Д.Н. Применение ГИС-технологий для исследования процессов формирования dna водохранилищ [Application of GIS-technologies for research of the processes of reservoir bottom relief formation]. *Труды Международной научно-практической конференции в 2 томах. Том I: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами*, 2015, pp. 31-36. (In Russ.)
8. Калинин В.Г., Ковязина И.А. К оценке осадконакопления на Камском водохранилище [Assessment of sediment accumulation in the Kama reservoir]. *Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 4 томах «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии»*, 2017, vol. 2, pp. 95-100.
9. Кузнецова Л.А. *Формирование донных отложений равнинных водохранилищ (на примере Камского водохранилища)* [Formation of bottom sediments of plain reservoirs (on the example of the Kama reservoir)]: дис. ... канд. географ. наук. Перм', 1981. 224 p. (In Russ.)
10. Лопух П.С. *Закономерности развития водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана* [Regularities of development of water reservoirs of slow water exchange, their utilization and protection]. Мн.: БГУ, 2000. 332 p. (In Russ.)
11. Матаргин Ю.М. *Гидрология водохранилищ* [Hydrology of reservoirs]. Перм': Издательство PGU, PSI, PSSGK, 2003. 296 p. (In Russ.)
12. Назаров Н.Н. Географическое изучение берегов и акваторий камских водохранилищ [Geographical study of shores and water areas of Kama reservoirs]. *Географический вестник*, 2006, no. 2, pp. 18-36. (In Russ.)
13. Назаров Н.Н. *Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края* [Geodynamics of the coasts of the Perm Krai reservoirs]. Перм': Издательство ЗАО «Полиграфкомплект», 2008. 152 p. (In Russ.)
14. Место и роль экзогенных процессов в формировании донных отложений Вотkinsкого водохранилища [Place and role of exogenous processes in the formation of bottom sediments of the Votkinskoye reservoir] / Н.Н. Назаров, В.М. Анисимов, В.Г. Калинин, С.А. Симиренов, Д.Г. Туняталин, И.В. Фролова. *Вопросы физической географии и геоэкологии Урала*, 2000, pp. 85-93. (In Russ.)
15. Назаров Н.Н. Русловые процессы и морфолитогенез ложа водохранилищ [Channel processes and morpholithogenesis of reservoir beds]. *Географический вестник*, 2009, no. 1, pp. 1-7. (In Russ.)
16. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 7. Chast' 1: Gidrologicheskie nablyudeniya na ozerakh i vodokhranilishchakh* [Instruction to hydrometeorological stations and posts. Issue 7. Part 1: Hydrological observations on lakes and reservoirs]. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1972. 261 p. (In Russ.)
17. Perevoshchikova O.A., Kalinin V.G. К оценке пространственных неоднородностей dna долинных водохранилищ (на примере Камского) [Evaluation of spatial heterogeneities of the bottom relief of valley reservoirs (on the example of the Kama reservoir)]. *Географический вестник*, 2014, no. 3 (30), pp. 18-26. (In Russ.)
18. Печеркин И.А. *Геодинамика побережий камских водохранилищ. Част' 2: Геологические процессы* [Geodynamics of the coasts of the Kama reservoirs. Part 2: Geological processes]. Перм', 1969. 308 p. (In Russ.)
19. Печеркин И.А. *Формирование прибрежной отмели на Камском водохранилище* [Formation of the coastal shoal on the Kama reservoir]. *Гидротехническое строительство*, 1959, no. 12, pp. 23-25. (In Russ.)
20. П'янков С.В., Калинин В.Г. *GIS i matematiko-kartograficheskoe modelirovanie pri issledovanii vodokhranilishch (na примере камских): monografiya* [GIS and mathematical and cartographic modeling in the study of reservoirs (by the example of the Kama reservoirs): a monograph]. Перм': Издательство ОOO «Алекс-Пресс», 2011. 158 p. (In Russ.)
21. Тарвердиев Р.Б. *Расчет стока наносов рек, впадающих в Мингечавурское водохранилище* [Calculation of sediment load of rivers flowing into the Mingechaur reservoir]. *Kompleksnye issledovaniya vodokhranilishch*, 1978, v. 4, p. 87-94. (In Russ.)

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 23.03.2024

Accepted: 20.02.2025

Калинин Виталий Германович

Доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-5559-6284, e-mail: vkgalinin@gmail.com

Беляева Ирина Алексеевна

Начальник отдела водного хозяйства и регулирования водопользования Камского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов, г. Пермь, Российская Федерация, 0009-0002-8441-8676, e-mail: irinakoviazina@mail.ru

Vitaliy G. Kalinin

Dr. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof., Head of the Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5559-6284, e-mail: vkgalinin@gmail.com

Irina A. Belyaeva

Head of the Department of Water Management and Water Use Regulation, Kama Basin Water Administration of the Federal Agency of Water Resources, Perm, Russian Federation, 0009-0002-8441-8676, e-mail: irinakoviazina@mail.ru