

УДК 556.552:551.43(470.53)

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В РАЙОНЕ  
ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА****Шайдулина А.А., Китаев А.Б.***ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь,  
e-mail: hydrology@psu.ru*

Практически впервые выполнено комплексное исследование района переменного подпора Камского водохранилища. Специфические черты этого участка показаны через особенности его морфометрии (глубина, ширина, характер береговой линии, островность), гидродинамический режим, характер уровенного режима и своеобразие донного рельефа водоема. Установлено, что в зависимости от колебания уровня воды происходит постоянное перемещение границы выклинивания подпора, что сказывается на гидродинамическом режиме потока и характере переносимых им наносов. Исследование уровенного режима водоема позволило установить границы района. Гидродинамический режим водохранилища представлен как системообразующий фактор переформирования его котловины. Дана характеристика фактических скоростей течения воды (по материалам 1964–2016 гг.) на исследуемом участке водоема (от пгт Тюлькино до п. Усть-Пожва). Направленность процессов трансформации котловины изучаемого района оценена безразмерным параметром, представляющим собой отношение фактических скоростей течения воды к размывающим скоростям потока. Представлены критерии, определяющие размыв котловины, аккумуляцию наносов в ней и устойчивое состояние. Дана оценка специфики процессов трансформации котловины в разных частях исследуемого протяжения водохранилища при различных отметках уровня воды периода навигации. Выявлены временные отрезки соответствующие размыву котловины водоема, приходящиеся на май-июнь в верхней части исследуемого участка и на май – в более низком по течению районе. Установлены такие же отрезки времени навигационного периода, соответствующие аккумуляции наносов. Отмечена тенденция снижения активности размыва котловины вниз по течению потока и усиление процессов отложения наносов в том же направлении. Представлены рекомендации по мониторингу трансформации котловины в различных частях района переменного подпора водохранилища.

**Ключевые слова:** водохранилище, район переменного подпора, гидродинамический режим**FEATURES OF THE HYDRODYNAMIC REGIME IN THE AREA OF VARIABLE  
BACKWATER OF THE KAMA RESERVOIR****Shaydulina A.A., Kitaev A.B.***Perm State University, Perm, e-mail: hydrology@psu.ru*

Practically the complex research of the region variable a skid of the Kama Reservoir is for the first time executed. Peculiar features of this section are shown through features of its morphometry (depth, width, character of the coastline, an ostrovnost), the hydrodynamic mode, character of the urovenny mode and an originality of a ground relief of a reservoir. It is set that depending on oscillations of water level there is a constant relocation of boundary of a vyklinivaniye a skid that affects the hydrodynamic mode of a flow and character of the deposits transferred by it. The research of the urovenny mode of a reservoir allowed to set region boundaries. The hydrodynamic mode of a water reservoir is provided as a backbone factor of rearrangement of its hollow. The characteristic of the actual speeds of a current of water (on materials of 1964-2016) on the researched reservoir section is this (from the uts of Tyulkino to the item Ust'-Pozhva). Directivity of processes of transformation of a hollow of the studied region is estimated by the dimensionless parameter representing the attitude of the actual speeds of a current of water towards the blurring flow rates. The criteria defining a hollow scour, accumulation of deposits in it and stable conditions are provided. An assessment of specifics of processes of transformation of a hollow in different parts of the researched water reservoir zone in case of different marks of water level of the period of navigation is given. The time spans corresponding to a reservoir hollow scour, falling on May-June in the upper part of the researched section and for May – in the region, lower on a current, are revealed. The same intervals of time of the navigation period the appropriate accumulations of deposits are set. The tendency of decrease of the activity of a scour of a hollow downstream a flow and gain of processes of adjournment of deposits in the same direction is marked. Recommendations about monitoring of transformation of a hollow in different parts of the region variable a water reservoir skid are provided.

**Keywords:** reservoir, area of variable backwater, hydrodynamic regime

Водохранилища являются сравнительно молодыми и развивающимися системами, в отличие от рек, на которых они созданы. Их уникальной чертой является ускоренный режим протекания всех гидрологических процессов, которые стремятся в состояние равновесия. При сработке из подпора выходит верхняя часть искусственного водо-

ема, называемая нами районом переменного подпора (рис. 1). Его протяженность на Камском водохранилище составляет 135 км (45% длины), а границами служат: снизу – п. Усть-Пожва, а сверху – пгт. Тюлькино. В отдельные (многоводные) годы подпор заходит на 25 км выше. Среди всего разнообразия аквальных геосистем этот район

наиболее не изучен с гидрологических позиций, поскольку гидродинамический режим испытывает постоянное воздействие от регулирования стока плотинами ГЭС. В зависимости от колебания уровня происходит постоянное перемещение границы выклинивания подпора, что сказывается на гидродинамическом режиме потока и переносимых им наносов. Однако изучение этого района имеет не только теоретический (моделирование и прогноз переформирования ложа водоема в сложных гидродинамических условиях), но и практический интерес. Здесь расположен Березниковско-Соликамский промышленный комплекс, активно использующий данный участок водохранилища в разных целях (приемник сточных вод, судовой путь для проводки плотов и пр.).

тельных работ в целях улучшения условий судоходства, что чрезвычайно важно в условиях экономического развития региона. Уже сейчас рассматривается запрос о восстановлении на участке от пгт Керчевский до г. Соликамска гарантированных габаритов судового хода и обслуживания в течение всей навигации. На 2017 г. из федерального бюджета выделено дополнительное финансирование для восстановления судоходных условий в Боровской воложке и на участке Боровск – Соликамск. В настоящее время участок выше г. Соликамска используется только эпизодически, во время весеннего половодья для вывода плотов, когда обеспечены необходимые габариты пути. В остальной период проводка плотов и движение судов здесь осложнены и практически не проводятся.

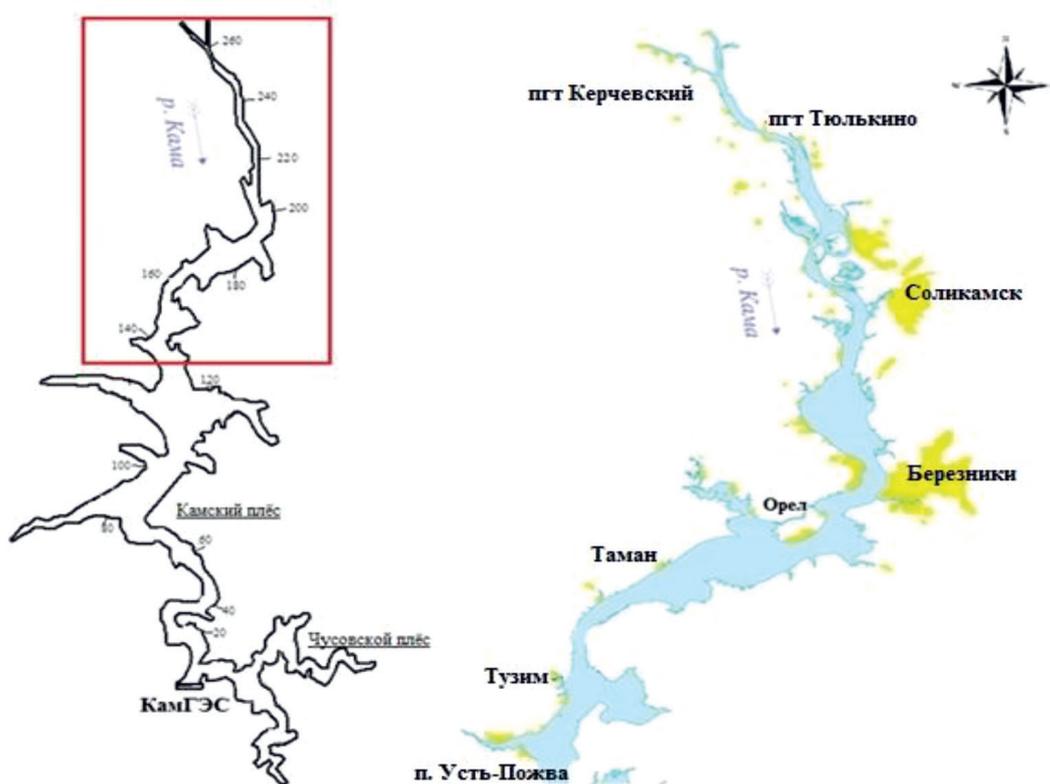


Рис. 1. Район переменного подпора Камского водохранилища

Антропогенное использование, совместно со сложным гидродинамическим режимом, формирует своеобразное экологическое состояние водоема и неоднозначно влияет на переформирование его котловины. Полученные данные необходимы для обоснования проведения дноуглуби-

#### Материалы и методы исследования

Район переменного подпора Камского водохранилища является сложной природно-антропогенной системой [1]. Процесс формирования подводного рельефа здесь имеет сложный и неоднородный в про-

странственно-временном отношении характер. Однако регулирование стока привносит в него черты цикличности. При этом гидродинамический режим играет ведущую роль в функционировании и развитии исследуемого объекта, поскольку определяет направленность процессов трансформации котловины. Направленность процессов может быть оценена при помощи предложенного нами безразмерного параметра  $\eta$ :

$$\eta = \frac{v}{Vp}, \quad (1)$$

где  $v$  – фактическая или расчетная скорость потока (м/с), а  $Vp$  – размывающая (м/с). При этом если  $\eta > 1$ , то происходит размыв,  $\eta = 1$  – стабилизация,  $\eta < 1$  – аккумуляция.

Размывающая скорость является одной из критических скоростей потока (наряду с неразмывающей) и служит количественным выражением противозрозионной устойчивости грунтов [2]: Она определяется по выражению

$$Vp = \lg \frac{8,8H}{d} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)d}{1,75\rho}}, \quad (2)$$

где  $H$  – глубина на вертикали, м;  $d$  – диаметр наносов, м (при этом под корнем – средний, а в знаменателе – максимальный диаметры);  $\rho_1$  – плотность наносов, 2650 кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды, 1000 кг/м<sup>3</sup>. Размывающая (срывающая) скорость ( $Vp$ ) отвечает началу массового перемещения частиц. Если фактические скорости потока превышают среднюю размывающую скорость течения, то происходит процесс переформирования котловины, размыв и переотложение наносов.

Фактическая или расчетная скорость потока ( $v$ ), находящаяся в числителе уравнения (1), определена нами двумя способами. Фактические скорости течения получены путем обобщения материалов наблюдений с 1964 по 2016 г. Расчетные значения скорости потока у дна заданной обеспеченности определены для стандартных [3] квантилей кривой распределения вероятностей. В качестве количественной оценки скоростей течения в районе переменного подпора приняты три расчетных обеспеченности – 25, 50 и 75%.

Еще одним важным элементом гидродинамического режима является уровень режим. От него зависит смена условий в районе переменного подпора Камского водохранилища. В отдельные периоды года условия здесь приближаются к речным, существовавшим до создания плотины, а в другие – к полностью водохранилищ-

ным. На основании особенностей уровня режима и показателей морфометрии проведено деление района переменного подпора Камского водохранилища на участки [4]. Проведенные исследования позволили выделить в верхней части 3 характерных участка, находящихся внутри района переменного подпора: пгт. Керчевский – пгт. Тюлькино (с преобладанием речных условий); пгт. Тюлькино – г. Березники (река и водохранилища имеют здесь «равные права»); г. Березники – п. Усть-Пожва (практически в течение всего года здесь наблюдаются водохранилищные условия). В рамках этих участков и определена направленность процессов трансформации котловины с помощью параметра  $\eta$ . При этом ветровольный режим также рассмотрен в пределах этих участков.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Участок от пгт. Керчевский до пгт. Тюлькино имеет протяженность порядка 15 км. В отдельные (многоводные годы) подпор заходит в устья Верхней Камы и Вишеры. На этом участке наблюдается преобладание речных условий. Водохранилище здесь находится в границах коренного русла р. Камы и лишь местами выходит на пойму, затопляя ее на глубину 0,5–1,0 м. Участок характеризуется повышенной островностью [5]. Здесь расположены острова Соломинский, Тюлькинский Верхний и Тюлькинский, которые при уровнях выше 111 м.абс полностью затопляются. Наличие островов создает разветвленность русла, что сказывается на ширине участка. Ширина водохранилища по участку колеблется от 0,3–0,4 км на суженных участках до 1–1,1 км в местах островных расширений. Четвертичные образования по правому и левому берегам представлены флювиогляционными отложениями, такими как окатанные валуны, галечники, гравий, пески (косо- и диагонально-слоистые). Режим скоростей и направления течений на участке изучен слабо. С уверенностью можно говорить только о скоростях потока у пгт. Тюлькино. Максимальные скорости наблюдаются в весенний период и достигают 2 м/с, а минимальные – в периоды летне-осенней стабилизации и зимней сработки, составляя в среднем 0,10–0,30 м/с.

Наибольший интерес для исследования с точки зрения гидродинамики представляет участок от пгт. Тюлькино до г. Березники. Его протяженность около 70 км. Граница вы-

клинивания перемещается по этому участку, разграничивая речные и водохранилищные условия. Уровни выше минимального навигационного уровня (МНУ, 106 м.абс) здесь наблюдаются порядка 8–9 месяцев в году, приближенные к нормальному подпорному уровню (НПУ, 108,5 м.абс) – 5–6 месяцев. В среднем Березники выходят из подпора на 1–3,5 месяца. Это участок со смешанными условиями. Река и водохранилища имеют здесь «равные права». Очертания берегов в основном сходны с ними же до затопления. Ширина участка изменяется от 0,3–0,4 км в сужениях до 6–6,5 км в местах островных расширений. Преобладающие глубины на фарватере увеличиваются вниз по течению от 4–5 м до 6–8 м. Наибольшая глубина достигает 12–16 м и отмечается в конце участка у г. Березники. Поперечный профиль на этом участке резко асимметричен. Если под левым берегом глубины достигают 10 и более метров, то к правому наблюдается постепенное их уменьшение до 4–6 м. В правобережной части расположено обширное мелководье с песчаными островами. При повышении уровня до НПУ часть островов затапливается. На рассматриваемом участке водохранилище имеет небольшую излучину, отклоняясь к востоку. Отложения представлены окатанными валунами, галечниками, гравием и песками. Также здесь встречаются суглинки и глины [5].

Анализ поверхностных и придонных скоростей течения в различные месяцы навигации показал, что наибольшие скорости течения на исследуемом участке отмечаются в период весеннего половодья и наполнения водохранилища, когда почти для всего участка характерен режим близкий к естественному. Их значения в среднем составляют 0,73 и 0,63 м/с на поверхности и у дна соответственно, при максимуме в 1,92 и 1,0 м/с.

В период летне-осенней стабилизации уровней режим скоростей в районе переменного подпора более сложен. Он определяется, с одной стороны, условиями работы Камского гидроузла и отметкой уровня воды в створе ГЭС и, с другой – условиями стока р. Камы на изучаемом участке. Скорости в этот период достаточно стабильны. Максимальное их значение достигает 0,49 м/с. Средние значения поверхностных скоростей в этот период колеблются от 0,32 до 0,49 м/с, а придонных – от 0,23 до 0,48 м/с.

Участок от г. Березники до п. Усть-Пожва имеет протяженность около 50 км. Уровни в пределах МНУ – УПС (106,0–101,0 м абс, где 101 – уровень предполо-

водной сработки, УПС) здесь наблюдаются в среднем с января по апрель. При прохождении половодья граница формирования больших уклонов перемещается на этот участок, обуславливая здесь рост уклонов более чем в 10 раз (от 0 до 0,15‰). В целом практически в течение всего года здесь наблюдаются водохранилищные условия (уровень держится на отметках 106,0–108,5 м абс).

При создании водохранилища участок от г. Березники до п. Усть-Пожва претерпел более существенные изменения, чем выше-лежащая часть водоема. Затопление поймы привело к увеличению глубин и ширины водной поверхности. Преобладающие глубины на фарватере на участке от Березников до п. Усть-Пожва при НПУ – 10–12 м. На мелководье глубины составляют 2–4 м. Это так называемый четкообразный участок водоема. Здесь на протяжении свыше 50 км от п. Орел и до п. Усть-Пожва отмечаются резкие чередования расширений акватории до 8–8,5 км (устье р. Кондас, п. Городище) и сужений до 1,2–1,5 км (д. Быстрая, п. Усть-Пожва).

Ниже острова Орел правый берег сложен полигенетическими отложениями. В основном это суглинки и супеси лёссовидных почв. У п. Усть-Пожва их сменяют отложения третьей надпойменной террасы, представленные галечниками, гравием, песками, супесями, суглинками и глинами. Левый берег ниже г. Березники сложен аллювиальными отложениями верхнего звена первой и второй надпойменных террас. Это галечники, гравий, пески, супеси, суглинки и глины.

Наивысшие значения скоростей течения на участке приурочены к фазе наполнения водохранилища и составляют в среднем 0,54 м/с на поверхности и 0,42 м/с у дна. Скорости в Березниках и Усть-Пожве уменьшаются по сравнению с выше-лежащими участками за счет выравнивания уклона, происходящего вследствие большего влияния подпора. В период летне-осенней стабилизации средние значения поверхностных скоростей составляют 0,20–0,44 м/с, а придонных 0,10–0,30 м/с.

На участке пгт. Тюлькино – г. Березники скорости, превышающие срывающие (0,36 м/с), приурочены к моменту весеннего наполнения (май-июнь) и наблюдаются по всему живому сечению. Однако уже при приближении к Березникам скорости потока падают, и только в многоводный период их значения превышают величину срывающих скоростей. Размыв на участке Берез-

ники – п. Усть-Пожва происходит только в многоводный период, при скоростях 75% обеспеченности и более. У п. Усть-Пожва расчетные скорости заданной обеспеченности (25, 50, 75%) у дна во все периоды ниже размывающих скоростей потока.

Расчет параметра  $\eta$ , примененный для оценки направленности процессов трансформации котловины по створам района переменного подпора Камского водохранилища

лица, показал, что процессы размыва преобладают при всех отмеченных обеспеченностях и уровнях в створе пгт Тюлькино. В остальных створах (кроме п. Усть-Пожва) размыв преобладает при всех рассмотренных уровнях при обеспеченности 25% и ниже. В створе п. Усть-Пожва при 25% обеспеченности и выше отмечаются процессы стабилизации и аккумуляции соответственно (рис. 2).

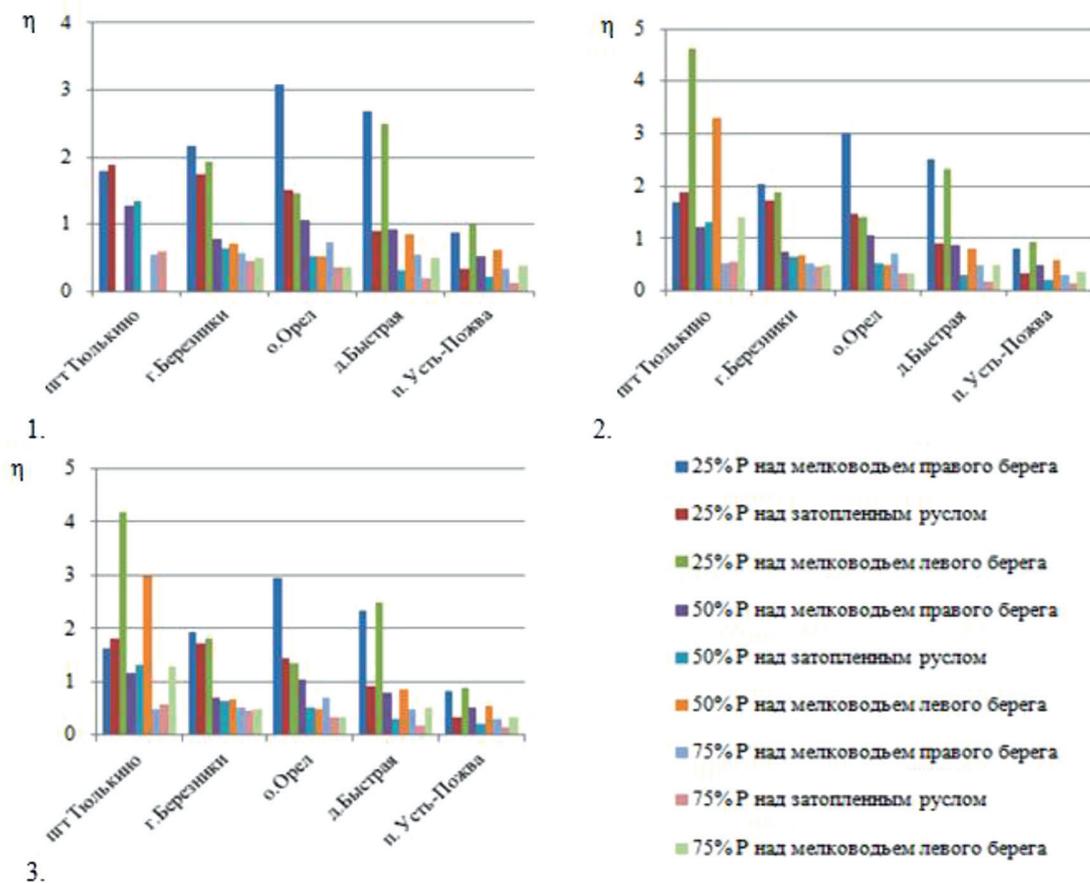


Рис. 2. Параметр  $\eta$  по створам района переменного подпора Камского водохранилища при уровне: 1 – 106 м. абс, 2 – 107 м. абс, 3 – 108,5 м. абс

Параметр  $\eta$  по месяцам навигационного периода в районе переменного подпора Камского водохранилища

Месяц	пгт. Тюлькино – г. Березники		г. Березники – п. Усть-Пожва	
	107 м. абс	108,5 м. абс	107 м. абс	108,5 м. абс
Май	<b>1,97</b>	<b>1,94</b>	<b>1,20</b>	<b>1,17</b>
Июнь	<b>1,48</b>	<b>1,45</b>	0,86	0,83
Июль	0,71	0,70	0,46	0,44
Август	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	0,51	0,50
Сентябрь	0,80	0,79	0,29	0,28

Примечание. \* жирным шрифтом отмечены значения, свидетельствующие о процессе размыва, жирным шрифтом с наклоном – значения, близкие к стабилизации.

Распределение параметра  $\eta$  по месяцам навигационного периода в районе переменного подпора Камского водохранилища (таблица) свидетельствует о том, что размыв при уровнях 107 и 108,5 м. абс на участке пгт. Тюлькино – г. Березники происходит в периоды май и июнь, стабилизация наблюдается в августе, а аккумуляция наносов – в июле и сентябре. На участке г. Березники – п. Усть-Пожва процессы размыва происходят только в мае, в остальные месяцы (июнь – сентябрь) здесь преобладают процессы аккумуляции.

Особенности гидродинамического режима в районе переменного подпора в значительной степени обусловлены его морфометрическими особенностями. Естественный приток по рекам Каме и Вишере, а также положение подпорных уровней полностью определяют режим скоростей течения в верхнем районе Камского водохранилища, на участке переменного подпора от пгт. Керчевский до г. Березники. Преобладающим является проточное течение, которое «идет» здесь транзитом. От п. Орел и ниже уже на некоторых участках начинает сказываться влияние ветрового воздействия на движение водной массы [6].

### Выводы

1. Район переменного подпора на отдельных участках характеризуется разным уровнем режимом, определяющим прочие гидрологические условия и особенности. При этом важную роль в положении и устойчивости выделенных границ определяет водность года. Анализ водного баланса свидетельствует о тренде к увеличению приходной части, однако до 2010 г. был маловодный период и наблюдалась достаточно ранняя сработка водохранилища. В зависимости от колебания уровня происходит постоянное перемещение верхней и нижней границы выклинивания подпора, что сказывается на гидравлическом режиме потока и режиме наносов. В сложившихся здесь благоприятных для отложения наносов условиях русловой режим приобретает однонаправленный характер регрессивной аккумуляции. Однако, как показывает практика, этот процесс может нарушаться и становится непредсказуемым.

2. Применение параметра  $\eta$  как косвенного показателя направленности процессов трансформации котловины показало, что процессы размыва преобладают при всех отмеченных обеспеченностях и уровнях в створе пгт. Тюлькино. В остальных створах (кроме п. Усть-Пожва) размыв преобладает при всех рассмотренных уровнях при обеспеченности 25% и ниже. В створе п. Усть-Пожва

при 25% обеспеченности и выше отмечают процессы стабилизации и аккумуляции соответственно и здесь, на входе в озеровидный район, формируется тело заиления.

3. Помимо естественных факторов, перформирование котловины Камского водохранилища в районе переменного подпора обусловлено и антропогенным воздействием, таким как расчистка судового хода на отдельных участках. Однако бюджетного финансирования на проведение таких работ в последние годы не всегда достаточно. Сочетание двух факторов: сокращение бюджетного финансирования на содержание водных путей и ранняя сработка водохранилища – приводит к усилению неуправляемых деформаций русла. В данной ситуации значительно возрастает необходимость улучшения мониторинга русловых процессов, обеспечения надежного прогнозирования их развития для принятия своевременных мер по нейтрализации возможных негативных последствий.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 16-45-590546 p\_a).*

### Список литературы

1. Двинских С.А., Шайдулина А.А. Применение системного подхода к оценке условий трансформации котловины Камского водохранилища в районе переменного подпора // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. VI Межд. науч.-практ. конф. – Пермь, 2017. – Т. 1. – С. 46–51.
2. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков / В.Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 374 с.
3. Свод правил по проектированию и строительству: СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: нормативно-технический материал. – М.: Изд. ПНИИИС Госстроя России, 2004. – 72 с.
4. Шайдулина А.А. Особенности уровня подпора Камского водохранилища / А.А. Шайдулина // Географический вестник = Geographicalbulletin. – 2016. – № 4 (39). – С. 44–56.
5. Атлас Пермского края / ред. Тартаковский А.М. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. – 124 с.
6. Китаев А.Б. Скоростной режим района переменного подпора Камского водохранилища и его возможные изменения в связи с созданием хозяйственного объекта / А.Б. Китаев, Д.Е. Клименко, О.В. Ларченко // Географический вестник. – 2010. – № 4 (15). – С. 52–62.

### References

1. Dvinskih S.A., Shajdulina A.A. Primenenie sistemnogo podhoda k ocenke uslovij transformacii kotloviny Kamского vodohranilishha v rajone peremennogo podpora // Sovremennye problemy vodohranilishh i ih vodosborov: tr. VI Mezhd. nauch.-prakt. konf. Perm, 2017. T. 1. pp. 46–51.
2. Goncharov V.N. Dinamika ruslovyh potokov / V.N. Goncharov. L.: Gidrometeoizdat, 1962. 374 p.
3. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu: SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik: normativno-tehnicheskij material. M.: Izd. PNIIS Gosstroja Rossii, 2004. 72 p.
4. Shajdulina A.A. Osobennosti urovennogo rezhima v rajone peremennogo podpora Kamского vodohranilishha / A.A. Shajdulina // Geograficheskij vestnik = Geographicalbulletin. 2016. no. 4 (39). pp. 44–56.
5. Atlas Permskogo kraja / red. Tartakovskij A.M. Perm: Perm. gos. nac. issled. un-t., 2012. 124 p.
6. Kitaev A.B. Skorostnoj rezhim rajona peremennogo podpora Kamского vodohranilishha i ego vozmozhnye izmeneniya v svyazi s sozdaniem hozjajstvennogo obekta / A.B. Kitaev, D.E. Klivenko, O.V. Larchenko // Geograficheskij vestnik. 2010. no. 4 (15). pp. 52–62.