

УДК 502/504:551.322:338

К. Л. САВЕЛЬЕВ

ОАО «Институт «Гидропроект»

Д. В. КОЗЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

ЭКОНОМИКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО БОРЬБЕ С ЗАЖОРАМИ И ЗАТОРАМИ ЛЬДА

Эффективность противозажорных и противозаторных мероприятий следует рассматривать с точки зрения надежности способа предотвращения зазора или затора льда при наименьших издержках с учетом экологических последствий и некоторых рисков. Предложена экономико-вероятностная методика оценки эффективности мероприятий по борьбе с зазорами и заторами льда. Рассмотрен пример определения рисков и вероятности их появления для противозаторного мероприятия.

Противозаторные и противозажорные мероприятия, методика оценки, риск, вероятность, эффективность, издержки, ущерб, искусственный затор.

It is necessary to consider the efficiency of ice anti-congestion and anti-jam measures with a view of reliability of the preventing method of ice congestion or jam under minimal costs taking into consideration ecological consequences and some risks. There is proposed an economic – probabilistic method of assessment of measures on ice congestion and jam control. The assessment example of risks and probability of their arising for the anti-jam measure is considered.

Anti-jam and anti-congestion measures, method of assessment, risk, probability, efficiency, costs, damage, artificial ice jam.

Определение наиболее эффективного способа воздействия на процесс заторо- и зажорообразования и средства защиты от заторов или зажоров основывается, в первую очередь, на анализе гидрологических условий формирования скоплений льда, а также на сравнении ожидаемого ущерба со стоимостью противозаторного (противозажорного) мероприятия при учете имеющихся технических возможностей. Ежегодное проведение противозаторных и противозажорных мероприятий

требует больших денежных затрат. Кроме того, противозажорные и противозаторные мероприятия могут оказать негативное воздействие на окружающую среду [1, 2]. Поэтому рассматривать эффективность противозажорных и противозаторных мероприятий следует не только с точки зрения надежности конкретного способа предотвращения зажоро- или заторообразования при наименьших издержках, но и с учетом экологических факторов и последствий, а также некоторых рисков.

Предлагается считать наиболее эффективным набор тех мероприятий по борьбе с зазорами и заторами льда, для которых сумма S (плановые затраты на проведение противозаторных или противозажорных мероприятий, а также риски нанесения ущерба экономике региона и окружающей среде в результате затопления территории при использовании таких мероприятий), определяемая по следующей формуле, является минимальной:

$$S = R_{\text{НХ}} + R_{\text{ОС}} + R_{\text{ЧЖ}} + S_{\text{ОС}} + S_{\text{МВЗ}} \rightarrow \min, (1)$$

где $R_{\text{НХ}}$, $R_{\text{ОС}}$ – риски нанесения ущерба народному хозяйству в результате затопления территории и вреда окружающей среде соответственно; $R_{\text{ЧЖ}}$ – риск нанесения ущерба здоровью человека; $S_{\text{ОС}}$ – запланированные выплаты за нанесение вреда окружающей среде в результате применения плановых мероприятий по борьбе с зазорами и с заторами за один год, р./год; $S_{\text{МВЗ}}$ – полная стоимость запланированных мероприятий по борьбе с зазорами и с заторами льда за один год, р./год (определяется на основе сметных расчетов).

Риски $R_{\text{ОС}}$, $R_{\text{ОС}}$ определяют так:

$$R_{\text{НХ}} = \frac{P_{\text{А/В}} Y_{\text{НХ}}}{N_{\text{лет}}}, (2)$$

$$R_{\text{НХ}} = \frac{P_{\text{А/В}} Y_{\text{ОС1}}}{N_{\text{лет}}}, (3)$$

где $P_{\text{А/В}}$ – условная вероятность того, что при выбранном плане перечне противозажорных и противозаторных мероприятий (событие B) будет нанесен ущерб экономике региона в результате затопления территории из-за формирования зазора или затора льда (событие A); $N_{\text{лет}}$ – параметр, который учитывает обеспеченность зазорного или заторного уровня и, по сути, равен числу лет (если при оценке рисков берутся гидрометеорологические условия, соответствующие заторному или зазорному уровню 1 % обеспеченности превышения, то $N_{\text{лет}} = 100$ лет; при 0,01 % обеспеченности превышения $N_{\text{лет}} = 10^4$ лет); $Y_{\text{НХ}}$ – ущерб, нанесенный экономике региона в результате затопления территории при заданных гидрометеорологических условиях, соответствующих выбранному параметру $N_{\text{лет}}$ (определяется на основе действующего законодательства РФ); $Y_{\text{ОС1}}$ – ущерб, нанесенный окружающей среде в результате затопления территории при уровне воды, соответствующем параметру $N_{\text{лет}}$.

Сумма S в формуле (1) состоит из двух частей:

риски, связанные с проведением противозажорных или противозаторных мероприятий ($R = R_{\text{НХ}} + R_{\text{ОС}} + R_{\text{ЧЖ}}$);

запланированные затраты, связанные с проведением рассматриваемых мероприятий ($S_{\text{ПЛАН}} = S_{\text{ОС}} + S_{\text{МВЗ}}$).

Таким образом, организация, проводящая противозажорные и противозаторные мероприятия, ежегодно должна

выплачивать сумму страховых взносов в размере R страховым компаниям и иметь в наличии денежные средства в размере $S_{\text{ПЛАН}}$ для выполнения вышеперечисленных мероприятий. Соотношение между рисками R и суммой плановых затрат $S_{\text{ПЛАН}}$ может варьироваться в зависимости от принятого параметра $N_{\text{лет}}$. Чем больше значение $N_{\text{лет}}$, тем меньше сумма ежегодных выплат страховым компаниям R и больше сумма плановых затрат $S_{\text{ПЛАН}}$. В связи с этим параметр $N_{\text{лет}}$ должен быть законодательно утвержден для различных районов России. Например, для районов, которые имеют большую социально-экономическую значимость (высокая плотность населения, развитая промышленность и сельское хозяйство и др.), параметр $N_{\text{лет}}$ должен быть достаточно большим, что влечет за собой относительно небольшие суммы страховых выплат R , но относительно большие суммы плановых затрат $S_{\text{ПЛАН}}$. Большие суммы плановых затрат $S_{\text{ПЛАН}}$ свидетельствуют о высокой надежности противозажорных или противозаторных мероприятий.

Основной сложностью в данной методике является описание рисков и определение вероятности их появления $P_{\text{А/В}}$. Для определения вероятностей требуется проанализировать натурные наблюдения за формированием зазоров или заторов льда, журналы, в которых описан процесс проведения мероприятий (число попыток, объем используемого расходного материала) и другие статистические данные.

Рассмотрим пример задания условной вероятности $P_{\text{А/В}}$ для некоторого противозаторного мероприятия.

Пример определения рисков и вероятности их появления для противозаторного мероприятия. Наиболее полный перечень противозаторных мероприятий представлен в методических рекомендациях [3, 4]. В качестве примера рассмотрим одно мероприятие – создание искусственного затора.

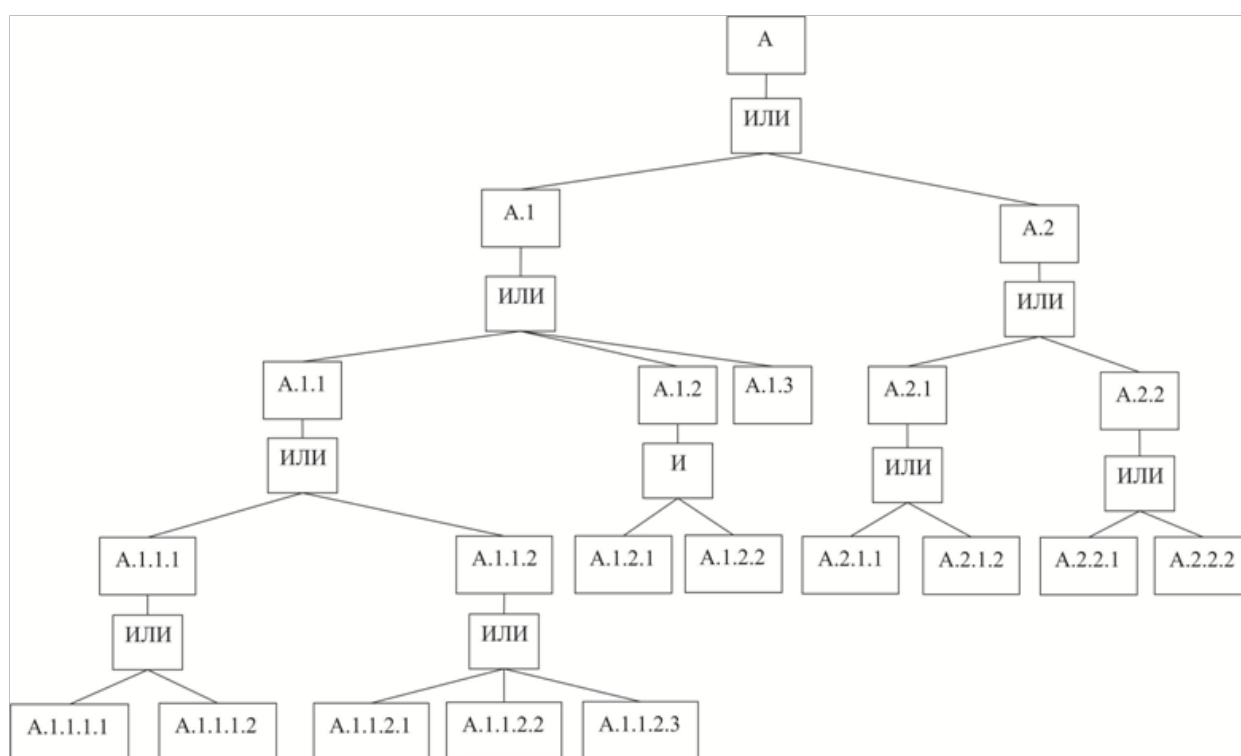
Создание искусственного затора – это многократное предварительное мероприятие по борьбе с заторами. Искусственный затор применяют на тех участках рек, где задержка льда в период весеннего ледохода не нанесет значительного экономического ущерба в результате затопления вышележащей территории.

Существует много способов создания

искусственного затора. Наибольший интерес вызывает способ искусственного заторообразования в результате повышения прочности льда. Когда на участке реки, где необходимо создать искусственный затор, образуется сплошной ледяной покров, то с поверхности льда снег счищают. Для этой цели используют бульдозеры. В результате теплообмен между поверхностью льда и холодным воздухом увеличивается, благодаря чему лед становится толще и прочнее по сравнению с участками, расположенными выше и ниже по течению. В конце зимы, когда температура воздуха становится выше 0 °С, наоборот,

при помощи бульдозеров снег сгребают в то место, где необходимо создать искусственный затор, чтобы замедлить процесс таяния ледяного покрова. Дополнительно к этому, для увеличения прочности льда в период отрицательных температур, толщину льда увеличивают искусственно, намораживая лед поливными машинами.

Для анализа эффективности создания искусственного затора требуется определить вероятность образования затора такой мощности, которая повлечет за собой затопление территории с нанесением ущерба экономике региона и вреда жизни и здоровью людей (рисунок, табл. 1) [6].



«Дерево отказов» для события Прорыв искусственного затора (затвор не сформировался) с последующим формированием затора ниже по течению и затоплением территории с причинением ущерба экономике региона, экологии и здоровью людей

В верхней части «дерева отказа» находится следствие, а причины этого следствия расположены ниже. Если для появления одного события требуется выполнение одновременно нескольких событий (в «дереве отказов» обозначено через «И»), то вероятность следствия определяется как произведение вероятностей появления причин. Например, $P_{A.1.2} = P_{A.1.2.1} \cdot P_{A.1.2.2}$, где $P_{A.1.2}$ – вероятность образования достаточно мощного половодья, $P_{A.1.2.1}$ и $P_{A.1.2.2}$ – вероятность того, что к концу зимы на поверхности речного бассейна будет накоп-

лен достаточно большой объем снега и вероятность интенсивного роста температуры воздуха в период весенней оттепели соответственно.

Когда причиной следствия является одно из нескольких независимых друг от друга событий (в «дереве отказов» обозначено как «ИЛИ»), то вероятность появления события-следствия определяется так:

$$P = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_i) \cdot \dots \cdot (1 - P_N),$$
 где P – вероятность появления события-следствия; P_i – вероятность появления события-причины.

Перечень событий «древа отказов»

Индекс события					Описание события
A					Прорыв искусственного затора (затор не сформировался) с последующим формированием затора ниже по течению и затоплением территории с причинением ущерба экономике региона, экологии и здоровью людей
A	1				Прорыв искусственного затора в результате недостаточной прочности (толщины) льда перед началом весеннего ледохода в месте формирования искусственного затора
A	1	1			Работы по формированию искусственного затора выполнены не в полном объеме, что привело к образованию недостаточной толщины льда к концу зимы либо к быстрому таянию льда в период весенней оттепели
A	1	1	1		Требуемая толщина льда на участке создания искусственного затора не достигается к концу зимы в результате невыполненных работ
A	1	1	1	1	Количество и интенсивность выпадения твердых осадков в зимний период превышает скорость уборки снега при имеющемся парке техники, инвентаря и трудовых ресурсов
A	1	1	1	2	Возникновение риска выхода из строя техники, порчи инвентаря и уменьшения количества трудовых ресурсов (заболевание, увольнение и т. д.)
A	1	1	2		Прочность льда на участке создания искусственного затора в период весенней оттепели стала меньше требуемой в результате невыполненных работ
A	1	1	2	1	В случае, когда даты появления положительных температур воздуха (ее интенсивность повышения) и начала весеннего ледохода примерно соответствуют прогнозируемым значениям, работы по защите поверхности льда от теплового воздействия воздуха выполнены не полностью в результате возникновения риска выхода из строя техники, порчи инвентаря и уменьшения количества трудовых ресурсов (болезнь, увольнение и т. д.)
A	1	1	2	2	Работы по защите поверхности льда от теплового действия воздуха в период весенней оттепели выполнены не полностью из-за появления весеннего ледохода раньше, чем прогнозировалось
A	1	1	2	3	В результате затяжной весны с частыми появлениями отрицательных температур воздуха работы по защите поверхности льда от теплового воздействия воздуха выполнены слишком рано, что привело к замедлению роста прочности (толщины) льда
A	1	2			Формирование относительно мощного половодья
A	1	2	1		Аккумуляция достаточно большого объема снега на поверхности речного бассейна к концу зимы
A	1	2	2		Достаточно интенсивное повышение температуры воздуха в конце зимы и в начале весны
A	1	3			Проявление относительно мягкой и снежной зимы
A	2				Искусственный затор не сформировался в результате равномерного вскрытия рассматриваемого речного участка, что может быть при примерно одинаковом распределении прочности (толщины) льда по длине водного объекта
A	2	1			Разрушение ледяного покрова произошло в относительно короткие сроки после перехода температуры воздуха через 0 °С в период весенней оттепели
A	2	1	1		Сформировался относительно мощный паводок в результате быстрого повышения температуры воздуха и других факторов
A	2	1	2		К концу зимы образовалась относительно небольшая толщина льда из-за мягких климатических условий в зимний период
A	2	2			Разрушение ледяного покрова произошло в относительно длительные сроки после перехода температуры воздуха через 0 °С в период оттепели
A	2	2	1		Период оттепели характеризуется затяжной весной
A	2	2	2		В зимний период выпало небольшое количество твердых осадков, в результате чего снежный покров окажет незначительное влияние на процесс роста толщины льда

Например, событию-следствию **Прорыв искусственного затора** или он не сформировался (событие А) могут предшествовать две причины: либо **Прорыв искусственного затора в результате того, что прочность (толщина) сплошного ледяного покрова перед весенним ледоходом меньше требуемого значения для формирования устойчивого искусственного затора** (событие А.1), либо **Искусственный затор не сформировался** (событие А.2). Тогда вероятность появления события А

определяется так:

$$P_A = 1 - (1 - P_{A.1}) \cdot (1 - P_{A.2}).$$

Из рисунка видно, что 12 событий в «древе отказов», расположенных внизу, не имеют событий-причин (события с индексами: А.1.1.1.1, А.1.1.1.2, А.1.1.2.1, А.1.1.2.2, А.1.1.2.3, А.1.2.1, А.1.2.2, А.1.3, А.2.1.1, А.2.1.2, А.1.2.2.1, А.2.2.2) и являются событиями, на основе которых определяются вероятности появления вышеразложенных в «древе отказов» событий. Для определения вероятности появления

событий, расположенных внизу «древа отказов», необходимо задать параметр $N_{\text{лет}}$, входящий в формулы (2) и (3). Если рассматриваемый параметр равен 10 годам, то мощность затора соответствует заторному уровню 10 % обеспеченности превышения, а если 100 годам, то 1 % обеспеченности превышения. По заданному параметру $Y_{\text{нх}}$ определяют максимальный расход воды в период весеннего ледохода, при котором возник затор мощностью рассматриваемой обеспеченности превышения, а также ущерб $Y_{\text{нх}}$ и $Y_{\text{ос}}$ [1, 5, 6]. После определения расхода воды рассчитывают толщину льда и размер участка проведения мероприятия для создания искусственного затора с целью оценки объема рассматриваемых работ [1]. Затем устанавливают сроки начала и завершения мероприятия, а также вычисляют плановые издержки $S_{\text{ос}}$ и $S_{\text{мвз}}$.

После определения суммы плановых издержек и ущербов находят вероятности событий, представленных в «древе отказов». С этой целью определяют максимальный заторный уровень, соответствующий параметру $N_{\text{лет}}(H_*)$. Предположим, что имеется ряд наблюдений за $N_{\text{лет}}$ лет. Тогда из этого ряда выбирают те года, в которых наблюдался максимальный заторный уровень больше либо равный уровню H_* . Далее требуется задать вероятности следующих событий:

1) в выбранных годах количество твердых осадков за зимний период превышает то количество, которое использовалось при планировании работ; вероятность

$$P_{\text{снз}} = \frac{N_{\text{снз}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{лет}}$ – число лет, в которых количество твердых осадков за зимний период превышало то количество, которое использовалось при планировании работ (снз);

2) выход из строя техники, порча инвентаря и уменьшение количества трудовых ресурсов (вероятность определяют на основе статистической обработки данных);

3) дата начала ледохода меньше даты завершения планируемых работ; вероятность

$$P_{\text{днлм}} = \frac{N_{\text{днлм}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{днлм}}$ – дата начала ледохода меньше даты завершения планируемых работ (днлм);

4) модуль суммы среднесуточных

температур воздуха, вычисленный за период от плановой даты перехода температуры воздуха выше 0°C до плановой даты начала весеннего ледохода, является отрицательным; вероятность

$$P_{\text{ствм0}} = \frac{N_{\text{ствм0}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ствм0}}$ – модуль суммы среднесуточных температур воздуха, вычисленный за период от плановой даты перехода температуры воздуха выше 0°C до плановой даты начала весеннего ледохода, является отрицательным (ствм0);

5) объем снега на поверхности речного бассейна на конец зимы превышает плановые значения; вероятность

$$P_{\text{срб}} = \frac{N_{\text{срб}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{срб}}$ – объем снега на поверхности речного бассейна на конец зимы превышает плановые значения (срб);

6) модуль суммы среднесуточных температур воздуха окажется меньше соответствующих плановых значений за зимний период; вероятность

$$P_{\text{стз}} = \frac{N_{\text{стз}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{стз}}$ – модуль суммы среднесуточных температур воздуха окажется меньше соответствующих плановых значений за зимний период (стз);

7) модуль суммы среднесуточных температур воздуха, рассчитанный за период от плановой даты перехода температуры воздуха выше 0°C до плановой даты начала весеннего ледохода, является больше планового значения; вероятность

$$P_{\text{ствбп}} = \frac{N_{\text{ствбп}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{ствбп}}$ – модуль суммы среднесуточных температур воздуха, вычисленный за период от плановой даты перехода температуры воздуха выше 0°C до плановой даты начала весеннего ледохода, больше планового значения (ствбп);

8) длительность периода от даты перехода среднесуточной температуры воздуха выше 0°C до начала весеннего ледохода больше плановой; вероятность

$$P_{\text{двп}} = \frac{N_{\text{двп}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{двп}}$ – длительность периода от даты перехода среднесуточной температуры воздуха выше 0°C до начала весеннего ледохода больше плановой (двп);

9) толщина снежного покрова на льду в зимний период меньше требуемой

толщины; вероятность определяется по формуле

$$P_{\text{тсл}} = \frac{N_{\text{тсл}}}{N_{\text{набл}}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{тсл}}$ – толщина снежного покрова на льду в зим-

ний период меньше требуемой толщины (тсл) соответственно, при этом выборка берется из тех лет, для которых максимальные заторные уровни в период весеннего ледохода больше либо равны уровню H .

Вероятность появления событий, расположенных внизу «дерева отказов», определяют так, как показано в таблице 2.

Таблица 2

Формулы для определения вероятности событий, расположенных внизу «дерева отказов»

Индекс события					Формула вероятности появления события
A	1	1	1	1	$P_{A.1.1.1.1} = P_{\text{снз}}$
A	1	1	1	2	Вероятность определяется в результате обработки статистических данных выхода из строя используемой в работе техники и инвентаря, а также статистических данных уменьшения трудовых ресурсов из-за заболевания, увольнения и прочих причин
A	1	1	2	1	
A	1	1	2	2	$P_{A.1.1.2.2} = P_{\text{днлм}}$
A	1	1	2	3	$P_{A.1.1.2.3} = P_{\text{ствм0}} \cdot P_{\text{двп}}$
A	1	2	1		$P_{A.1.2.1} = P_{\text{срб}}$
A	1	2	2		$P_{A.1.2.2} = P_{\text{ствбп}}$
A	1	3			$P_{A.1.3} = P_{\text{стз}}$
A	2	1	1		$P_{A.2.1.1} = P_{\text{срб}} \cdot P_{\text{ствбп}}$
A	2	1	2		$P_{A.2.1.2} = P_{\text{стз}}$
A	2	2	1		$P_{A.2.2.1} = P_{\text{двп}}$
A	2	2	2		$P_{A.2.2.2} = P_{\text{тсл}}$

Выводы

Предлагаемая методика описания рисков и определения вероятности их появления позволяет оценить вероятность зимнего наводнения, причиной которого могут быть заторно-зажорные явления, и с высокой вероятностью масштаб затопления прилегающих территорий. Кроме того, методика позволяет определить наиболее эффективный способ воздействия на процесс заторо- и зажорообразования и найти средства защиты от заторов или зажоров.

1. Бузин В. А., Зиновьев А. Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). – Барнаул: ИВиЭП СО РАН, 2009. – 168 с.

2. Козлов Д. В. Лед пресноводных водоемов и водостоков. – М.: МГУП, 2000. – 263 с.

3. Методические рекомендации по предотвращению образования ледовых заторов на реках Российской Федерации и борьбе с ними (второе издание). – М.: ФЦ ВНИИ ГОЧС, 2004. – 234 с.

4. Методические указания по борьбе с

заторами и зажорами льда: ВСН-028–70. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1970. – 151 с.

5. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: СП 33-101-2003: утв. Госстроем России; приказ № 218 от 26.12.2003 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.standartov.ru> (дата обращения 15.09.14).

6. Методические указания. Гидроэлектростанции. Расчет расходов на возмещение ущерба, расходов на восстановление, а также упущенной выгоды от аварий и инцидентов: СТО РусГидро. – М.: ОАО «РусГидро», 2011. – 54 с.

7. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений: СТП ВНИИГ 210.02. НТ-04. – СПб: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2005. – 121 с.

Материал поступил в редакцию 23.09.14.
Савельев Константин Леонидович, ведущий инженер
 Тел. 8-903-541-87-92
 E-mail: savelevkl@mail.ru

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры «Комплексное использование водных ресурсов и гидравлика»
 E-mail: kozlovdv@mail.ru