

УДК 519.22:626/627

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПРОГНОЗ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАТОРОВ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СТРОЯЩЕЙСЯ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук;

Е.Г. Романчук

(Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины)

Приводятся результаты вероятностного прогнозирования образования заторов в нижнем бьефе Богучанской гидроэлектростанции, строящейся на р. Ангаре, при заполнении водохранилища.

Наведено результати імовірнісного прогнозування утворення заторів у нижньому б'єфі Богучанської гідроелектростанції, що будується на р. Ангари, при заповненні водосховища.

Given are the results of probabilistic forecasting of clogging in the downstream of Bohuchanskaja hydroelectric plant that built on the river Angara in the first filling the reservoir.

Согласно проекту заполнение водохранилища Богучанской ГЭС было намечено на март-апрель 2012 г. При этом предусматривалось снижение расхода попуска с 3100 м³/с до санитарного попуска воды в размере 1100 м³/с с целью максимального использования притока к створу гидроузла для заполнения водохранилища.

Режим заполнения водохранилища согласовывался с Енисейским речным пароходством. Заполнение планировалось закончить до открытия навигационного сезона (до середины мая), с плавным восстановлением величины сбросного расхода воды в нижнем бьефе гидроузла, начиная с 1 мая по 10 мая, до 3100 м³/с.

Расчеты термического и ледового режимов бьефов Богучанского гидроузла при условиях заполнения водохранилища с 01 марта, выполненные в лаборатории «Ледотермика и термика водоемов» ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [1], показали, что при резком снижении расходов в нижнем бьефе, с 3100 м³/с до 1100 м³/с, ожидается увеличение риска образования заторов с затоплением прилегающих территорий.

Неблагоприятные последствия прогнозировались как для холодного года с

суровой зимой и среднего года со средней по суровости зимой, так и для теплого года с теплой зимой, выбранных в качестве модельных лет по климатическим условиям. В качестве критерия для оценки года по климатическим условиям использовалась среднегодовая температура. Для холодного года с суровой зимой среднегодовая температура принималась равной $-5,7$ °С с вероятностью превышения $\sim 2\%$; для среднего года со средней по суровости зимой равной $-3,6$ °С, вероятность превышения $\sim 16\%$; для теплого года с теплой зимой равной $+0,1$ °С с вероятностью превышения $\sim 97\%$.

В статье излагаются результаты оценки риска образования заторов в нижнем бьефе Богучанского гидроузла при весеннем заполнении водохранилища для условий среднего года со средней по суровости зимой. Оценка риска проводилась с учетом результатов расчетного прогнозирования термического и ледового режимов в бьефах Богучанской ГЭС, выполненных во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [1], для периода заполнения водохранилища с 01 марта. Использовались также экспертные заключения о возможном подтоплении в нижнем бьефе и натурные данные об образовании заторов в период с 1974 по 2006 год в наиболее опасных створах. Натурные данные были представлены Енисейским бассейновым водным управлением (БВУ) Федерального агентства водных ресурсов России [2].

Средний год со средней по суровости зимой для оценки риска образования заторов был выбран по двум основным причинам. Во-первых, такой год является наиболее опасным с точки зрения образования заторов на Ангаре в естественных условиях. Во-вторых, климатические условия в регионе, как показывают метеорологические наблюдения, чаще всего отвечают среднему году. Подтверждается это и отрицательной асимметрией распределения среднегодовых температур, отвечающих разным модельным годам – холодному, среднему, теплему. Отрицательной асимметрией характеризуются и расчетные значения толщин льда, полученные для холодного, среднего и теплого модельных годов.

Исходя из этих предположений, в том числе и в запас риска, были установлены следующие расчетные значения вероятностей наступления климатических условий, соответствующих выбранным модельным годам:

для холодного года с суровой зимой Y_1 – по ежегодной вероятности превышения среднегодовой температуры соответствующего года, вероятность $P(Y_1) = 0,02, \text{ год}^{-1}$;

для теплого года с теплой зимой Y_3 – по ежегодной вероятности непревышения среднегодовой температуры этого года, $P(Y_3) = 0,03, \text{ год}^{-1}$;

для среднего года Y_2 – как дополнение суммы вероятностей климатических условий, характеризующих холодный и теплый годы, до единицы, $P(Y_2) = 0,95, \text{ год}^{-1}$.

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

По отметкам ожидаемых заторных подъемов уровней воды, полученных при расчетах термического и ледового режимов бьефов Богучанского гидроузла, во ВНИИГ были сделаны экспертные заключения о возможности подтопления в результате заторных явлений по 25 населенным пунктам, расположенным в нижнем бьефе Богучанской ГЭС [1].

Для холодного года с суровой зимой были даны 15 положительных заключений о возможности подтопления в результате заторов из 25 возможных случаев. Для среднего года со средней по суровости зимой были даны 25 положительных заключений о возможности подтопления в результате заторов из 25 возможных случаев. Для теплого года с теплой зимой были даны 7 положительных заключений о возможности подтопления в результате заторов из 25 возможных случаев. Другие статистические и экспертные данные для оценки вероятности возможного подтопления населенных пунктов в результате заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС в условиях снижения расходов отсутствовали.

Исходя из этого, условные вероятности подтопления населенных пунктов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС в результате заторных явлений в зависимости от модельного года были рассчитаны по формуле статистической вероятности в виде соотношения благоприятного количества исходов ($m_1 = 15$, $m_2 = 25$, $m_3 = 7$) к общему их количеству $N = 25$:

$$P(m | Y_i) = \frac{m_i}{N}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1,3}$ – индексы соответствующих модельных лет (результаты расчета см. в табл. 1).

Таблица 1

Условные вероятности подтопления населенных пунктов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС в результате заторных явлений в зависимости от модельного года

Параметр \ год	Холодный год Y_1	Средний год Y_2	Теплый год Y_3
Количество населенных пунктов, где ожидается подтопление, m	15	25	7
Условная вероятность подтопления, $P(m Y_i)$	0,6	1	0,28

Полная вероятность подтопления с учетом возможности образования заторов в любом модельном году определялась по формуле полной вероятности (табл. 2):

$$P(F) = \sum_i P(Y_i) \cdot P(m|Y_i). \quad (2)$$

Таблица 2

Безусловные вероятности и полная вероятность подтопления населенных пунктов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС в результате заторов

Параметр \ год	Холодный год Y_1	Средний год Y_2	Теплый год Y_3
Расчетная вероятность наступления модельного года, $P(Y_i)$, год ⁻¹	0,02	0,95	0,03
Условная вероятность подтопления, $P(m Y_i)$	0,6	1	0,28
Безусловная вероятность подтопления, год ⁻¹	0,012	0,95	0,0084
Полная вероятность подтопления, $P(F)$, год ⁻¹	0,9704		

Полагается, что вероятность $P(F) = 0,9704$ представляет собой верхнюю (sup) граничную оценку вероятности подтопления любого из 25 населенных пунктов, расположенных в нижнем бьефе Богучанской ГЭС (табл. 3), с учетом возможности реализации климатических условий для трех модельных лет. По сути, это и верхняя (sup) граничная оценка полной вероятности образования заторов для 25 населенных пунктов, расположенных в нижнем бьефе Богучанской ГЭС, на момент заполнения водохранилища (март-апрель).

На основе анализа природных условий на различных участках течения р. Ангары в нижнем бьефе Богучанской ГЭС во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева был отобран 21 створ возможного образования заторов (табл. 4). При этом среди опасных створов были выделены четыре створа, где наблюдалось не менее трех крупных заторов (письмо Енисейского БВУ от 11.08.2011, № 05-2174 [2]): 1) 121 км от ГЭС, с. Богучаны; 2) 231 км от ГЭС, с. Каменка; 3) 341 км от ГЭС, с. Рыбное; 4) д. Татарка.

При m_j случаях образования заторов в расчетном j -м створе за период наблюдений n лет условная вероятность образования затора в j -м створе при условиях C :

$$\hat{P}(S_j | C) = \frac{m_j}{n}, \quad (3)$$

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

где условия C представляют собой некоторые «осредненные» условия формирования заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища.

Таблица 3

Данные о подтоплении населенных пунктов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС в результате заторов при заполнении водохранилища

Населенный пункт	Возможность подтопления			Полная вероятность подтопления $P(F)$, год ⁻¹
	Холодный год, Y_1	Средний год, Y_2	Теплый год, Y_3	
Тагара	+	+	+	0,9704
Сыромолотово	-	+	-	
Чадобец	+	+	+	
Зеледеево	-	+	-	
Климино	-	+	-	
Краснодарский	-	+	-	
Пашутино	+	+	+	
Заимка	+	+	+	
Шиверский	+	+	-	
Красногорьевский	-	+	-	
Богучаны	+	+	-	
Ярки	+	+	-	
Иркинеево	-	+	-	
Артюгино	-	+	-	
Манзя	-	+	-	
Нижне Терянск	+	+	-	
Каменка	+	+	-	
Бык	+	+	-	
Кокуй	+	+	-	
Зайцево	-	+	-	
Пашино	-	+	-	
Рыбное	+	+	-	
Денисово	+	+	+	
Кулаково	+	+	+	
Новоангарск	+	+	+	

Данные об образовании заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС

Номер створа	Населенный пункт	Расстояние от ГЭС	Годы образования заторов	Количество заторов	$\hat{P}(S_j C)$
1		24 км			0,06061*
2		38 км			
3		54 км			
4		64 км			
5		69 км			
6		81 км			
7		103 км			
8	Богучаны	121 км	1974, 1977, 1985-1989, 1992, 1995, 1997, 1999, 2000, 2002, 2006	14 за 33 года	0,42424
9		148 км			0,06061*
10		164 км			
11		193 км			
12		212 км			
13	Каменка	231 км	1983, 1988, 1989, 1992, 1996, 1998, 2001, 2002, 2004, 2005, 2006	11 за 33 года	0,33333
14		262 км			0,06061*
15		271 км			
16		286 км			
17		319 км			
18	Рыбное	341 км	1975, 1989, 1991, 1992, 1997, 2001	6 за 33 года	0,18182
19		367 км			0,06061*
20		387 км			
21	Татарка	409 км	1988, 1995, 1997	3	0,09091

* Вероятность $\hat{P}(S_j | C) = 0,06061$ рассчитывалась из предположения, что количество опасных заторов в створах за период с 1974 по 2006 год не превышало двух случаев

С учетом вероятности $P(C)$ реализации условий C априорную оценку полной вероятности образования затора $\hat{P}(S_j)$ в некотором j -м створе можно получить по формуле:

$$\hat{P}(S_j) = P(C) \cdot \hat{P}(S_j | C). \quad (4)$$

Примем вероятность «осредненных» условий формирования заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища равной

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

расчетной вероятности реализации среднего года со средней по суровости зимой:
 $P(C) = P(Y_2) = 0,95$, год⁻¹. Результаты расчета вероятностей $\hat{P}(S_j)$ сведены в табл. 5.

Таблица 5

Вероятности образования заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища

Номер створа	Населенный пункт	Расстояние от ГЭС	$P(C)$	$\hat{P}(S_j C)$	$\hat{P}(S_j)$, год ⁻¹
1		24 км	0,95	0,06061	0,0575795
2		38 км			
3		54 км			
4		64 км			
5		69 км			
6		81 км			
7		103 км			
8	Богучаны	121 км		0,42424	0,403028
9		148 км		0,06061	0,0575795
10		164 км			
11		193 км			
12		212 км			
13	Каменка	231 км		0,33333	0,3166635
14		262 км		0,06061	0,0575795
15		271 км			
16		286 км			
17		319 км		0,18182	0,172729
18	Рыбное	341 км			
19		367 км		0,06061	0,0575795
20		387 км		0,09091	0,0863645
21	Татарка	409 км			

Анализ натуральных данных об образовании заторов в опасных створах (табл. 4) показывает, что в 1988, 1989, 1992, 1995, 1997, 2001, 2002, 2006 г. г. крупные заторы наблюдались одновременно в нескольких опасных створах (не менее чем в двух). В 1988, 1989, 1992, 1997 годах крупные заторы наблюдались не менее чем в трех наиболее опасных створах. В 25 случаях из 33 заторы наблюдались только в одном из выделенных БВУ опасных створов. Поэтому с запасом по риску можно принять, что события, связанные с образованием заторов в различных створах, представляют собой стохастически независимые и совместные (поскольку наблюдались в разных створах одновременно) события.

Воспользовавшись формулой вероятности объединения независимых совместных событий [3], получаем полную вероятность образования затора в

любом из возможных створов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища:

$$\hat{P}(S) = 1 - \prod_{j=1}^{21} (1 - \hat{P}(S_j)). \quad (5)$$

Подставляя вероятности $\hat{P}(S_j)$, имеем: $\hat{P}(S) = 0,8875, \text{ год}^{-1}$.

В то же время особо крупные (выдающиеся) заторы на исследуемом участке в природных условиях, случившиеся в 1988г. (Каменка, Татарка), 1999г. (Богучаны), 2001г. (Рыбное), возникали в единичных случаях. Можно предположить, что чем крупнее ожидается затор в одном из створов, тем меньше вероятность возникновения такого же крупного затора в другом створе. Следовательно, выдающиеся заторы в разных створах можно рассматривать как несовместные события.

При известной вероятности образования затора в любом из возможных створов, вероятность образования выдающегося затора в каждом отдельном створе в предположении несовместности событий можно оценить по формуле полной вероятности в виде [4, 5]:

$$P(S_j) = P(S) \cdot P(S_j | S), \quad (6)$$

где $P(S)$ – полная вероятность образования затора в любом из возможных створов; $P(S_j)$ – безусловная вероятность образования выдающегося затора в j -м створе, которая, в отличие от вероятности образования затора $\hat{P}(S_j)$ в этом створе, характеризует возможность уникального явления, несовместного с подобным уникальным явлением в другом створе; $P(S_j | S)$ – вероятность образования выдающегося затора в j -м створе при условии, что затор произошел в любом из возможных створов.

Вероятность $P(S_j | S)$ является байесовской вероятностью. Ее можно оценить, используя формулу Байеса.

Запишем формулу Байеса в виде [3, 5]:

$$P(S_j | S) = \frac{\hat{P}(S | S_j) \cdot \hat{P}(S_j)}{\sum_j \hat{P}(S | S_j) \cdot \hat{P}(S_j)}, \quad j = \overline{1, 21}, \quad (7)$$

где $\hat{P}(S | S_j)$ – условная вероятность образования затора в j -м створе, которую можно оценить как «вес» вероятности $\hat{P}(S_j)$ образования затора в j -м створе среди вероятностей образования заторов в других створах [5, 6]:

$$\hat{P}(S | S_j) = \frac{\hat{P}(S_j)}{\sum_j \hat{P}(S_j)}. \quad (8)$$

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

Результаты расчета вероятностей образования выдающихся заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища сведены в табл. 6.

Таблица 6

Вероятности образования заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища

Но- мер ство- ра	Насе- лен- ный пункт	Рассто- яние от ГЭС	$\hat{P}(S_j)$	$\hat{P}(S S_j)$	$\hat{P}(S_j) \cdot$ $\hat{P}(S S_j)$	$P(S_j S)$	$P(S_j)$
1		24 км	0,0575795	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
2		38 км					
3		54 км					
4		64 км					
5		69 км					
6		81 км					
7		103 км					
8	Богу- чаны	121 км	0,403028	0,20587	0,08297	0,4558	0,40452
9		148 км	0,0575795	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
10		164 км					
11		193 км					
12		212 км					
13	Камен- ка	231 км	0,3166635	0,16176	0,05122	0,28139	0,24973
14		262 км	0,0575795	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
15		271 км					
16		286 км					
17		319 км					
18	Рыб- ное	341 км	0,172729	0,08823	0,01524	0,08372	0,0743
19		367 км	0,0575795	0,02941	0,00169	0,0093	0,00826
20		387 км					
21	Татар- ка	409 км	0,0863645	0,04412	0,00381	0,02093	0,01858
Проверка $\sum_{j=1}^{21} =$				1		1	0,8875

Анализируя вероятности, приводимые в табл. 6, можно заметить, что образование выдающегося затора до начала заполнения водохранилища Богучанской ГЭС наиболее вероятно в створе, расположенном на расстоянии 121 км от ГЭС у поселка Богучаны. Причем эта вероятность оказалась даже немного больше вероятности образования любого затора в этом створе в естественных условиях. Что касается других потенциально опасных створов, то вероятности образования выдающихся заторов в них, по сравнению с вероятностями

образования обычных заторов, оказались существенно меньшими.

Результаты исследований термического и ледового режимов бьефов Богучанской ГЭС, выполненных во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [1], показывают, что при заполнении водохранилища в марте-апреле при расходах в нижнем бьефе, не превышающих $1100 \text{ м}^3/\text{с}$, имеются предпосылки для образования выдающихся заторов в любом из выделенных 21 потенциально опасных створов. Для подтверждения или опровержения этого предположения на основе формул (6)÷(7) нами был осуществлен вероятностный прогноз образования таких заторов в каждом створе с учетом верхней (sup) граничной оценки вероятности образования затора в любом из створов, принятой равной $P(F) = 0,9704$.

Результаты расчета вероятностей образования выдающихся заторов в различных створах до заполнения и при заполнении водохранилища представлены в табл. 7.

Таблица 7

Вероятности образования выдающихся заторов в нижнем бьефе Богучанской ГЭС до начала заполнения водохранилища и при его заполнении

Номер створа	Населенный пункт	Расстояние от ГЭС	Вероятность выдающегося затора, $P(S_i)$	
			До заполнения водохранилища	При заполнении водохранилища
1		24 км	0,00826	0,00903
2		38 км		
3		54 км		
4		64 км		
5		69 км		
6		81 км		
7		103 км		
8	Богучаны	121 км	0,40452	0,44231
9		148 км	0,00826	0,00903
10		164 км		
11		193 км		
12		212 км		
13	Каменка	231 км	0,24973	0,27306
14		262 км	0,00826	0,00903
15		271 км		
16		286 км		
17		319 км		
18	Рыбное	341 км	0,0743	0,08124
19		367 км	0,00826	0,00903
20		387 км		
21	Татарка	409 км	0,01858	0,02031
Проверка $\sum_{j=1}^{21} =$			0,8875	0,9704

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

Расчеты показали, что при заполнении водохранилища Богучанской ГЭС в марте-апреле при расходах в нижнем бьефе, не превышающих 1100 м³/с, ожидается увеличение вероятностей возникновения выдающегося затора в любом из выделенных потенциально опасных створов. При этом такое увеличение по сравнению с условиями до заполнения водохранилища может составить ~ 9%, а вероятность возникновения выдающегося затора в створе Богучаны может достигь 0,44231, год⁻¹.

* * *

1. Исследование термического и ледового режимов бьефов Богучанской ГЭС в период наполнения водохранилища с 01 марта 2012 г. Этап 5. Расчет возможных подъемов уровней воды на кромке полыньи в морозный период. Научно-технический отчет (заключительный). – СПб.: ВНИИГ им Б.Е. Веденеева, 2011. – 111 с.

2. О временных правилах использования водных ресурсов Богучанской ГЭС. Письмо Енисейского бассейнового водного управления (Енисейское БВУ) от 11.08.2011, № 05-2174. – 4 с.

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

4. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа. Пер. с англ. И. А. Вайнштейна. – М.: Наука, 1975. – 462 с.

5. Stefanyshyn D.V. Use of the Bayes' approach for assessment of damage risks of system failures / D.V. Stefanyshyn, K.G. Romanchuk // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems». July 7-11, 2009. Saint-Petersburg, Russia. P.P. 165-169.

6. Райфа Г. Прикладная теория статистических решений / Г. Райфа, Р. Шлейфер. Пер. с англ. А.К. Звонкина, З.Г. Маймина и Б.Л. Розовского. Под ред. и с предисловием Ю.Н. Благовещенского. – М.: Статистика, 1977. – 360 с.

Отримано: 15.06.2012 р.