

УДК 303.732.4

Многокритериальный выбор створа гидроэлектростанции на реке Индигирке в республике Саха (Якутия)

П.С. Панкратьев¹, В.А. Шакиров¹

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: mynovember@mail.ru
Статья поступила 25.04.2012, принята 24.09.2012

В статье формулируется проблема выбора створа плотины гидроэлектростанции. Рассматриваются факторы, усложняющие принятие решения – многокритериальность, отсутствие полной информации, невозможность дать количественную оценку по некоторым критериям. Предлагается многокритериальный подход к выбору перспективных створов плотины в условиях, когда лицо, принимающее решение, может лишь отразить превосходство одной альтернативы по отношению к другой. В качестве примера применения подхода рассматривается река Индигирка, протекающая на территории Республики Саха (Якутия). В начале анализа намечаются три перспективных центра развития и три возможных створа плотины гидроэлектростанции. На первом этапе проводятся водноэнергетические расчеты. Расчеты проводятся в четыре этапа с определением площади, объема водохранилища, «мертвого» объема водохранилища, гарантированной выработки электроэнергии. Целью расчетов является формирование показателей створов в виде зависимостей от нормального подпорного уровня гидроэлектростанции. На втором этапе разрабатывается иерархия целей и критериев проблемы принятия решений по выбору створа плотины гидроэлектростанции. По каждому критерию дается описание и проводится сравнение альтернатив. Применяется метод анализа иерархий. Особенностью является то, что лицо, принимающее решение, сравнивает альтернативы не по точечным оценкам, а по характеристикам-зависимостям от нормального подпорного уровня гидроэлектростанций. В завершение обсуждаются полученные результаты, рассматривается влияние отдельных факторов на результат сравнения.

Ключевые слова: системный анализ, выбор створа гидроэлектростанции, многокритериальный выбор, анализ иерархий.

Multiattribute choice of hydroelectric station dam site on the Indigirka river, the Sakha republic (Yakutiya)

P.S. Pankratyev¹, V.A. Shakirov¹

¹Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: mynovember@mail.ru
The article received 25.04.2012, accepted 24.09.2012

The problem of hydroelectric station dam site choice has been formulated in the article. The factors that make the process of decision-making more complicated - multicriteriality, the lack of complete information, the impossibility to quantify some criteria are considered. The multiattribute approach to the promising dam site selection in a situation, when a decision-maker can only reproduce the superiority of one alternative over the other is proposed. The Indigirka River, the Republic of Sakha (Yakutiya), is considered as an example of the approach application. At the beginning of the analysis, three promising development centers and three possible dam sites of the hydroelectric station are outlined. At the first stage, the water-energy calculations are performed. The calculations are performed in four stages to determine the area and volume of the reservoir, its inactive storage capacity, guaranteed power generation. The purpose of the calculations is to work out the dam site indicators in the form of dependences on the hydroelectric station normal headwater level. At the second stage, the goals and criteria hierarchy of the dam site choice problem are developed. Each criterion is given a description and the alternatives comparison is performed. The method of analytic hierarchy process is applied. The characteristic feature of the analysis is that a decision-maker compares the alternatives not by the point estimates but by the dependences on the normal headwater level of hydroelectric stations. Finally, the obtained results are discussed and the impact of individual factors on the comparison result is considered.

Keywords: systems analysis, hydroelectric station dam site choice, multiattribute choice, hierarchy analysis.

Выбор створа гидроэлектростанции (ГЭС) представляет собой сложную проблему, в ходе решения которой необходимо оценить энергетическую эффективность ГЭС, возможные экономические, экологические, социальные последствия. По многим аспектам проблемы не может быть дана количественная оценка, а в некоторых случаях не может быть получена и качественная оценка эксперта в виде высказываний «хорошо», «удовлетворительно». Известно, что для каждого

створа ГЭС должно быть намечено несколько вариантов уровней водохранилища, в ходе детальных многофакторных технико-экономических расчетов определен наилучший вариант ГЭС. Сложность процесса может быть существенно снижена, если на предварительной стадии исключить из рассмотрения неперспективные створы. Важно при этом использовать показатели, расчет которых не столь трудоемок, а также косвенные показатели. Ниже рассматривается подход к многокри-

териальному выбору наиболее перспективного створа ГЭС на реке Индигирке, протекающей на севере Республики Саха (Якутия).

Генерирующие мощности северных районов Республики Саха (Якутия) представлены в основном дизельными электрическими станциями (ДЭС). Низкий уровень транспортной инфраструктуры, многозвенность процесса поставок дизельного топлива и рост цен на светлые нефтепродукты определяют низкую экономическую эффективность работы автономных ДЭС. Неудовлетворительное техническое состояние большей частью устаревших и физически изношенных автономных энергоисточников приводит к недостаточной надежности энергоснабжения и неоправданно высоким финансовым затратам при эксплуатации.

Промышленное освоение многочисленных месторождений черных и цветных металлов, благородных металлов, неметаллических и горючих полезных ископаемых требует наличия в районах потенциального развития надежных энергетических источников.

Решением проблемы является строительство электростанций, использующих местные энергоресурсы, в том числе возобновляемые.

Реки Якутии обладают значительными запасами гидроэнергии. Из технически возможных к использованию гидроэнергоресурсов рек Восточной Сибири и Дальнего Востока в количестве 120 млн. кВт среднегодовой мощности примерно половина сосредоточена на территории Республики Саха (Якутия) [1].

Одними из перспективных для развития энергоснабжения можно считать Момский и Оймяконский районы с протекающей рекой Индигиркой. Достаточно благоприятные гидрологические условия районов, сосредоточение месторождений золота, сурьмы, вольфрама, каменного угля позволяют провести анализ нескольких вариантов строительства ГЭС.

Ситуационный план рассматриваемого района представлен на рис. 1.

Можно выделить три перспективных центра развития.



Рис. 1. Ситуационный план района.

Поселок городского типа Усть-Нера расположен вблизи богатейших месторождений золота, сурьмы,

вольфрама. Через поселок проходит федеральная автомобильная дорога М56 «Колыма», связывающая Якутск и Магадан.

Поселок городского типа Предпорожный, упраздненный в 2007 г., расположен вблизи месторождений золота, между поселками Хонуу и Усть-Нера.

Поселок Хонуу расположен в устье реки Момы. Перспективу поселка определяет стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утвержденная распоряжением правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р, в соответствии с которой запланировано строительство стратегической железнодорожной линии Якутск – Магадан. Кроме того, от поселка Хонуу Индигирка судоходна. Таким образом, в перспективе поселок может стать крупным транспортным узлом. Рост электрических нагрузок будет обусловлен строительством и обслуживанием железной дороги.

В каждом из центров потенциального развития были намечены створы С1, С2, С3 (рис. 1).

Перед проведением многокритериального сравнения створов необходимо выполнить водноэнергетические расчеты. Целью расчетов является получение основных критериев сравнения – диапазонов возможных площадей затопления, гарантированной выработки электроэнергии для трех створов. Этапы водноэнергетических расчетов приведены на рис. 2.

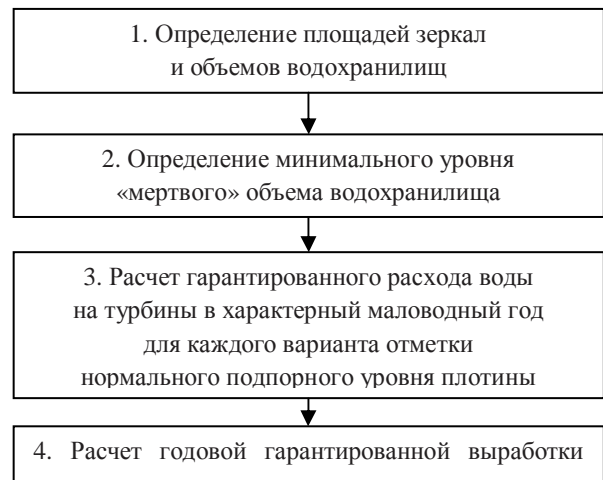


Рис. 2. Этапы проводимых водноэнергетических расчетов.

На первом этапе определяются площади зеркал водохранилищ F и объемы водохранилищ V от уровня воды H в водохранилище (рис. 3). Высота уровня воды в водохранилище в исследовании ограничивалась 60 м. Определялись площади зеркала водохранилища при высоте затопления от 0 до 60 м с шагом 10 м с использованием топографических карт масштабом 1:50000, интернет-ресурса maps.google.ru (рис. 3). Вычислялись промежуточные значения методом интерполяции. Таким образом были получены значения площадей затопления от 0 до 60 м с шагом 2 метра.

На втором этапе водноэнергетических расчетов (рис. 2) проводится оценка минимального уровня «мертвого» объема (УМО) водохранилища.

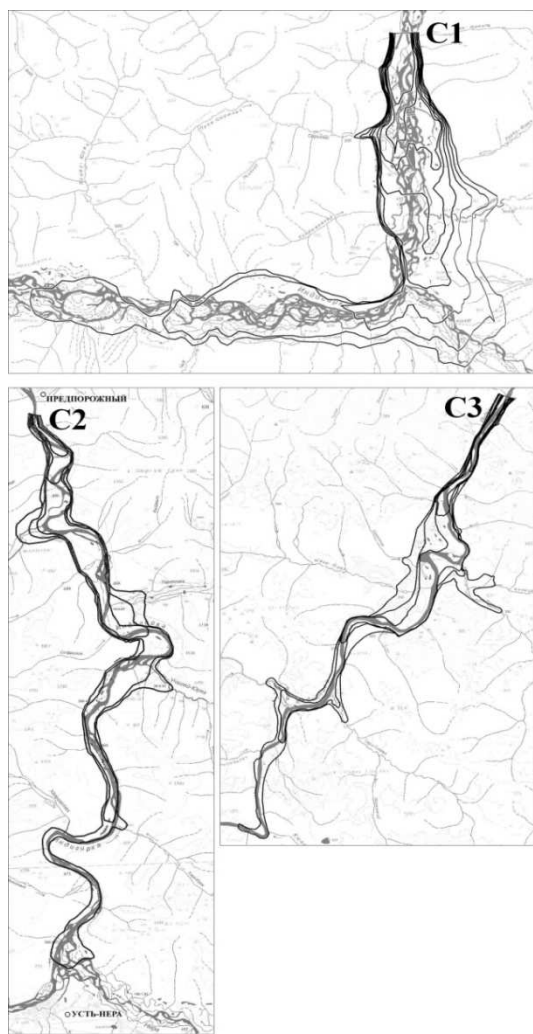


Рис. 3. Площади зеркал водохранилищ для створов С1, С2, С3 при различных уровнях затопления.

Основным фактором, определяющим величину «мертвого» объема, является количество твердого стока, переносимого потоком в рассматриваемом створе реки, за расчетный период эксплуатации водохранилища.

В таблице 1 представлены сведения о расходах наносов для места наблюдения «Индигирский» (Усть-Нера) [1].

Таблица 1

Средние годовые расходы взвешенных наносов, кг/с

Год наблюдений	Средний годовой расход воды, м ³ /с	Средний годовой расход взвешенных наносов, кг/с
1950	366	28,6
1952	305	9,79
1953	408	27,7
1954	530	9,95
1955	328	11,4
Среднее значение	387,4	17,5

При очень коротких рядах наблюдений над наносами необходимо привести имеющиеся данные к многолетнему периоду [2]:

$$R_0 = \frac{Q_0}{Q_{cp}} R_{cp}, \quad (1)$$

где R_0 – норма расхода наносов, кг/с; Q_0 – средний многолетний расход воды, м³/с; Q_{cp} и R_{cp} – соответственно среднее значение расхода воды и наносов за период наблюдений.

Так как наблюдения за наносами ограничены лишь пунктом Усть-Нера, значения средних расходов воды и наносов за период наблюдений с 1950 по 1955 гг. принимаются одинаковыми для трех намеченных створов С1, С2, С3. Приведение средних данных к многолетним осуществляется по известным многолетним расходам (таблица 2).

Таблица 2

Результаты расчета ожидаемых расходов наносов для створов С1, С2, С3

Створ	Средний многолетний расход воды, м ³ /с	Норма расхода наносов, кг/с
С1	425	19,2
С2	551,3	24,9
С3	621,8	28,1

Средний годовой объем наносов W_n может быть определен по формуле [2]:

$$W_n = \frac{R_0 N}{\beta}, \quad (2)$$

где N – количество секунд в году; β – объемный вес наносов, кг/м³, принимается в исследовании 1250 (для песчаных наносов).

Для горных водохранилищ расчетный срок эксплуатации принимается не менее 50 лет [3].

Исходя из этого, намечаем «мертвый» объем водохранилища [2]:

$$W_{MO} = W_n (1 - \delta) T_{экспл.} \quad (3)$$

где W_{MO} – «мертвый» объем водохранилища, определяемый наносами за период $T_{экспл.}$ лет, м³; δ – транзитная часть наносов, в долях от общего объема наносов.

Для глубоких горных водохранилищ практически весь сток наносов реки задерживается в водохранилище, и δ приближается к 0 [4].

Для окончательного выбора «мертвого» объема необходимо провести дополнительную проверку по критерию литорали. Литораль – это мелководная зона водохранилища, где глубины не превышают 2 м. Средняя глубина при УМО должна быть не менее 2,0-2,5 м, а площадь мелководья с глубинами менее 2 м – не более 20 % площади водохранилища [5], т. е.:

$$L_{Fi} = \frac{F_{Li}}{F_{Hi}} \leq 0,2, \quad (4)$$

где L_{Fi} – критерий литорали при уровне воды H_i ; F_{Li} – площадь литорали, соответствующая уровню H_i , m^2 ; F_{Hi} – площадь водной поверхности при уровне H_i , m^2 .

Выбранные с учетом условия (4) «мертвые» объемы водохранилищ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Выбранные «мертвые» объемы водохранилищ

Створ	УМО, м	«Мертвый» объем, m^3	Критерий литорали
С1	8	$53,997 \cdot 10^6$	0,200
С2	18	$118,09 \cdot 10^6$	0,196
С3	18,28	$35,45 \cdot 10^6$	0,118

На третьем этапе водноэнергетических расчетов (рис. 2) необходимо наметить отметки нормального подпорного уровня (НПУ) и провести расчет гарантированного расхода воды на турбины гидроэлектростанции.

НПУ – наивысший уровень воды, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации подпорного сооружения. Верхний предел отметок НПУ ограничен недопустимостью затопления крупных населенных пунктов. Нижний предел НПУ ограничен минимальным допустимым уровнем водохранилища.

Отметки НПУ и соответствующие им полезные объемы водохранилищ представлены в таблице 4.

Для выбранных отметок НПУ необходимо произвести расчет гарантированного расхода воды на турбины.

Таблица 4

Намеченные отметки НПУ и характеристики водохранилищ

Створ	Отметка НПУ, м	Полезный объем водохранилища, m^3
С1	20	$340,603 \cdot 10^6$
	30	$1010,003 \cdot 10^6$
	40	$1999,353 \cdot 10^6$
	50	$3580,953 \cdot 10^6$
	60	$5936,303 \cdot 10^6$
С2	30	$417,168 \cdot 10^6$
	40	$1064,168 \cdot 10^6$
С3	30	$135,681 \cdot 10^6$
	40	$396,881 \cdot 10^6$
	50	$763,756 \cdot 10^6$
	60	$1294,356 \cdot 10^6$

В исследовании рассматривается годовое регулирование стока, целью которого является выравнивание

стока в течение характерного маловодного года. Результаты расчета представлены в таблицах 5, 6.

На четвертом этапе водноэнергетических расчетов (рис. 2) проводится оценка годовой гарантированной выработки ГЭС.

Особенностью расчетов является изменение уровней верхнего и нижнего бьефов при регулировании стока ГЭС. Это приводит к изменению напора воды, отпускаемой на турбины, что в свою очередь отражается на развиваемой ими мощности.

Выработка электроэнергии за месяц i определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_i = 9,81 \cdot Q H_i \eta_t \eta_g N, \quad (5)$$

где Q – гарантированный расход воды на турбины, m^3/c ; H_i – напор воды в месяц i , м; η_t – КПД турбины, принимается предварительно 0,89; η_g – КПД генераторов, принимается предварительно 0,98; N – количество часов в месяце i .

Расчет гарантированной среднесуточной мощности ГЭС P проводится с помощью выражения:

$$P = 9,81 \cdot Q H_{\text{ср.взв}} \eta_t \eta_g, \quad (6)$$

где $H_{\text{ср.взв}}$ – средневзвешенный напор, м, определяемый по выражению:

$$H_{\text{ср.взв}} = \frac{\sum_{i=1}^T \mathcal{E}_i H_i}{\sum_i \mathcal{E}_i} \quad (7)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 7.

Полученные значения среднесуточной мощности могут служить ориентирами для оценки установленной мощности ГЭС. Расчет установленной мощности ГЭС представляет собой трудоемкую многофакторную технико-экономическую задачу, в процессе решения которой должна оцениваться эффективность ввода дополнительной установленной мощности по сравнению с вводом мощности на альтернативных электростанциях.

Дополнительная мощность может быть получена за счет отпуска воды на дополнительные турбины в период половодий. В таблице 6 представлены объемы сброса воды в процентах от годового стока, которые характеризуют потенциальные возможности введения дополнительной установленной мощности каждого створа на отметках НПУ.

Целью исследования является выбор наиболее перспективного или группы перспективных створов, для которых наиболее целесообразно проведение подобных технико-экономических многофакторных расчетов.

Исключение неперспективных створов существенно сократит объем расчетов, позволит осуществить более детальный системный анализ эффективных вариантов.

Таблица 5

Водноэнергетический расчет для створа С1 с НПУ 60 м для характерного маловодного 1948 года

Расход воды на турбины, $м^3/с$	Месяц	Поступление в водохранилище		Использование воды из водохранилища		Объем водохранилища, млн. $м^3$	
		Расход, $м^3/с$	Сток, млн. $м^3$	ГЭС, $м^3$	Сброс воды, $м^3$	Начало месяца	Конец месяца
310,337	06	1300	3369,600	804,393	–	53,997	2619,203
310,337	07	986	2640,902	831,206	–	2619,203	4428,899
310,337	08	767	2054,333	831,206	–	4428,899	5652,026
310,337	09	398	1031,616	804,393	–	5652,026	5879,248
310,337	10	111	297,302	831,206	–	5879,248	5345,344
310,337	11	36,7	95,126	804,393	–	5345,344	4636,077
310,337	12	11	29,462	831,206	–	4636,077	3834,333
310,337	01	4,59	12,294	831,206	–	3834,333	3015,421
310,337	02	1,03	2,492	750,767	–	3015,421	2267,145
310,337	03	0,31	0,830	831,206	–	2267,145	1436,769
310,337	04	0,098	0,254	804,393	–	1436,769	632,630
310,337	05	94,3	252,573	831,206	–	632,630	53,997

Итак, получены энергетические характеристики для трех намеченных створов при различных уровнях отметок НПУ. Дальнейший анализ проводится для трех альтернатив – С1, С2, С3.

Воздействие гидроэнергетического строительства может оказать разное влияние на прилегающие к месту строительства территории, а также на социальные и экономические условия района.

Таблица 6

Результаты расчета гарантированного расхода воды на турбины

Створ	НПУ, м	Гарантированный расход воды на турбины, $м^3/с$	Сброс воды в % от годового стока
С1	20	29,582	90,47 %
	30	79,040	75,48 %
	40	128,110	58,72 %
	50	203,441	34,45 %
	60	310,337	0,00 %
Годовой сток воды через С1, млн. $м^3$			9786,785
С2	30	37,072	91,32 %
	40	78,444	81,62 %
Годовой сток воды через С2, млн. $м^3$			13460,393
С3	30	14,728	97,03 %
	40	36,837	92,58 %
	50	64,164	87,07 %
	60	97,907	80,27 %
Годовой сток воды через С3, млн. $м^3$			15648,868

Таблица 7

Результаты расчета гарантированной выработки электроэнергии и среднесуточной мощности ГЭС

Створ	НПУ, м	Гарантированная выработка электроэнергии за год, тыс. кВт·ч	Среднесуточная гарантированная мощность, МВт
С1	20	38574,504	4,549
	30	148347,984	18,231
	40	308076,144	38,106
	50	602160,288	74,170
	60	1057781,520	129,735
С2	30	91550,688	10,985
	40	206267,880	24,260
С3	30	31752,192	3,651
	40	101556,888	11,787
	50	212307,288	25,005
	60	377211,456	45,137

Необходимо учитывать многочисленные факторы: окружающей среды; экономические; социально-экономические, здоровья и безопасности населения; общественного мнения.

Проведенные расчеты показали, что альтернативы в данной проблеме по некоторым факторам не могут характеризоваться определенными количественными показателями. Например, выработка электроэнергии площади затопления при строительстве ГЭС в створе 1 могут принимать различные значения в зависимости от НПУ. Кроме того, оценку социально-экономических

факторов удобно характеризовать описанием последствий строительства, а не количественными показателями. Поэтому необходимо применить метод многокритериального анализа альтернатив, позволяющий осуществлять сравнение вариантов без их оценки по абсолютной шкале. Таким является метод анализа иерархий (МАИ). Метод использует относительную шкалу сравнения (таблица 8) [6].

Таблица 8

Шкала относительной важности

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Значительное превосходство	5
Явное превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

В соответствии с методом, лицо, принимающее решение, проводит попарные сравнения всех критериев с помощью шкалы относительной важности, выражая количественным значением степень превосходства одного критерия по отношению к другому. Так формируется матрица парных сравнений критериев. Затем аналогично проводится парное сравнение альтернатив по каждому критерию, формируются матрицы парных сравнений альтернатив [6].

Вычислив собственные вектора матриц парных сравнений, проведя нормирование его элементов, можно получить вес критериев и альтернатив.

Определение собственного вектора матрицы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ в исследовании проводилось по выражению:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (8)$$

где λ_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий альтернативе или критерию i ; a_{ij} – оценка шкалы парных сравнений альтернатив или критериев i и j ; n – количество альтернатив или критериев.

Вес альтернативы w_i или критерия v_i определяется путем нормирования элементов собственного вектора.

Например, для определения веса критерия используется выражение:

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (9)$$

После определения веса альтернатив при сравнении по соответствующим критериям и веса критериев ста-

новится возможным получение оценки альтернатив с учетом всех критериев по выражению:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (10)$$

где V_j – показатель качества j -й альтернативы; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

Проведем многокритериальную оценку створов ГЭС с помощью МАИ.

На рис. 4 представлена предлагаемая иерархия целей проблемы выбора наилучшего створа для ГЭС, а также критерии, которыми будет оцениваться степень достижения целей.

Проведем описание целей и критериев, а также сравним альтернативы по критериям.

Цель «минимизация экономического воздействия» заключается в минимизации затрат при строительстве ГЭС. Требуется предварительно оценить затраты предстоящего строительства ГЭС в различных створах на стадии анализа, когда нет определенности с объемом финансирования, величиной электрических нагрузок в районе, типом станции (руслый, приплотинный, деривационный), установленной мощностью станции. При этом необходим учет лишь тех затрат, которые будут отличаться для вариантов С1, С2, С3. Предлагается привлечь критерии, которые косвенно отражают предстоящие затраты.

Критерий «ширина створа» представлен графиком зависимости от различных отметок НПУ. Для трех створов графики представлены на рис. 5.

При сравнении С1, С2, С3 по критерию ширины створа необходимо руководствоваться не только отличием в ширине при соответствующих отметках, но и учитывать ограничения С2, С3 по возможным отметкам НПУ. Так, С2 и С3 можно считать равными при сравнении по критерию (оценка 1 по шкале относительной важности). Также, видно, что С2 и С3 значительно превосходят С1 (оценка 5 по шкале относительной важности). Таким образом, можно сформировать матрицу парных сравнений, получить вес альтернатив по выражению, аналогичному (9). Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9

Сравнение С1, С2, С3 по критерию «ширина створа»

	С1	С2	С3	Вес
С1	1,000	0,200	0,200	0,091
С2	5,000	1,000	1,000	0,455
С3	5,000	1,000	1,000	0,455

Критерий «условия строительства» учитывает отличия в степени развития транспортной, хозяйственной инфраструктуры в месте строительства.

Так, створ 1 расположен в 9 км от федеральной автодороги М56 «Колыма», связывающей Якутск и Магадан.

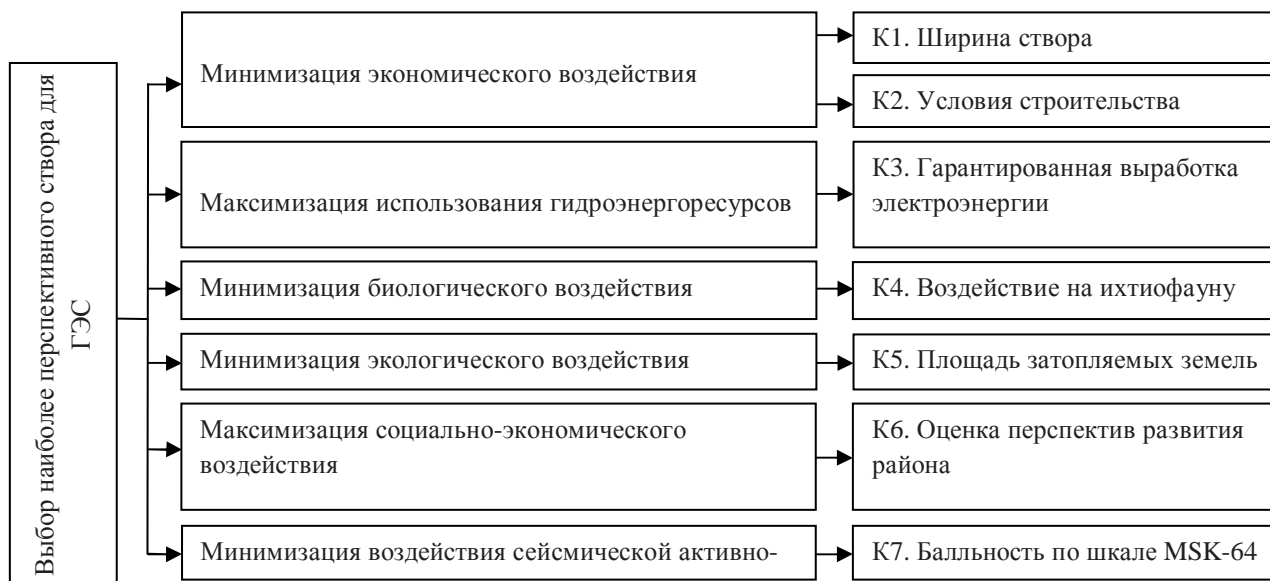


Рис. 4. Иерархия целей и критериев проблемы выбора створа ГЭС.

Ближайший населенный пункт – поселок городского типа Усть-Нера, являющийся административным центром Оймяконского улуса, расположен в 25 км. В Усть-Нере расположен аэропорт. Условия строительства можно оценить как весьма благоприятные.

Створ 2 расположен вблизи бывшего поселка Предпорожный, имевшего статус поселка городского типа. Автодороги к месту строительства отсутствуют. С ближайшим населенным пунктом Усть-Нерой, расположенной в 70 км, имеется связь только по зимнику в течение четырех месяцев. Часть грузовых перевозок может осуществляться баржами по реке. Строительство автодороги будет осложнено горными условиями. Условия строительства можно оценить как очень неблагоприятные.

2030 году возможно строительство стратегической железной дороги Якутск-Мома. В этой связи условия строительства оцениваются как благоприятные.

Матрица парных сравнений створов по критерию «условия строительства» представлена в таблице 10.

Таблица 10

Сравнение C1, C2, C3 по критерию «условия строительства»

	C1	C2	C3	Вес
C1	1,000	7,000	4,000	0,696
C2	0,143	1,000	0,250	0,075
C3	0,250	4,000	1,000	0,229

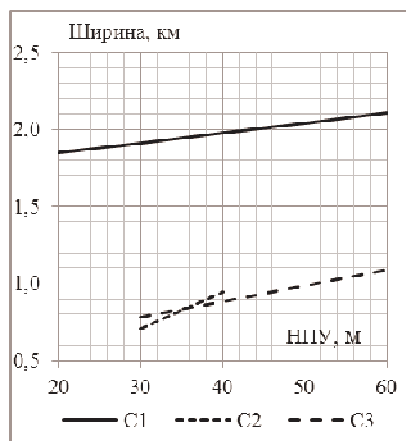


Рис. 5. Ширина створа в зависимости от отметки НПУ.

Створ 3 расположен в 56 км от поселка Хонуу, районного центра Момского улуса. Строительство дороги будет осуществляться в равнинных условиях. Имеется аэропорт, связанный рейсовыми линиями с Усть-Нерой. Речной порт позволяет осуществлять завоз грузов из порта Чокурдах, расположенного вблизи устья Индигирки, впадающей в Восточно-Сибирское море. К

Цель «максимизация использования гидроэнергоресурсов» характеризуется критерием «гарантированная выработка электроэнергии». На рис. 6 представлены графики зависимости гарантированной выработки ГЭС $W_{\text{гар}}$ от отметки НПУ.

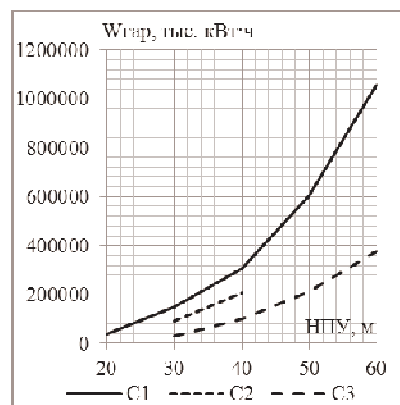


Рис. 6. Гарантированная выработка ГЭС в зависимости от отметки НПУ.

Цель «минимизация экологического воздействия» оценивается площадью затопляемых земель. На рис. 7 представлены графики зависимости площадей затопления от отметок НПУ.

С1 имеет существенное превосходство по выработке по сравнению с вариантами ГЭС в створах С2 и С3. Выработка ГЭС в створе 2 выше выработки ГЭС в створе 3, однако створ С2 имеет ограничение по выработке, так как предельная отметка НПУ равна 40 м.

В створе С3 выработка допустима при отметках НПУ 50, 60 м. В этой связи створы С2 и С3 оцениваются как равные по возможной выработке (таблица 11).

Таблица 11

Сравнение С1, С2, С3 по критерию «гарантированная выработка электроэнергии»

	С1	С2	С3	Вес
С1	1,000	5,000	5,000	0,714
С2	0,200	1,000	1,000	0,143
С3	0,200	1,000	1,000	0,143

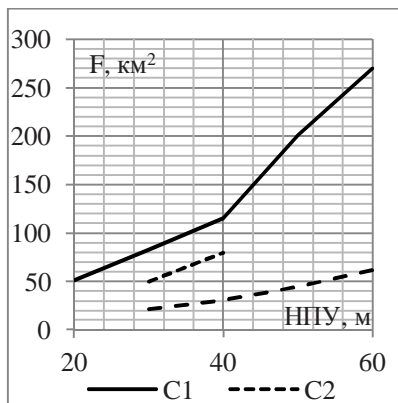


Рис. 7. Площади затопления земель при отметках НПУ.

Створ С3 имеет умеренное превосходство по сравнению со створом С2 на соответствующих отметках НПУ, а створ С2 имеет умеренное превосходство по сравнению со створом С1. Матрица парных сравнений альтернатив представлена в таблице 12.

Таблица 12

Сравнение С1, С2, С3 по критерию «площади затопления»

	С1	С2	С3	Вес
С1	1,000	0,333	0,200	0,105
С2	3,000	1,000	0,333	0,258
С3	5,000	3,000	1,000	0,637

Цель «минимизация биологического воздействия» характеризуется в исследовании оценкой влияния на ихтиофауну, которое выражается в преграждении путей миграции проходных и полупроходных видов рыб, в изменении кормобазы, а также в возможном попада-

нии и гибели рыб в водозаборах ГЭС. При этом могут сократиться запасы ценных рыб, а в некоторых случаях исчезнуть популяции тех или иных видов. Видовой состав ихтиофауны реки насчитывает 29 видов. Анализ влияния строительства ГЭС требует внимательного анализа нерестового хода, динамики популяций. В предварительном рассмотрении влияние на ихтиофауну от строительства ГЭС оценивается расстоянием от устья реки. Чем выше по течению створ ГЭС, тем меньше притоков исключается из возможного хода рыб. Таким образом, биологическое влияние створа 1 оценивается как слабое, створа 2 – среднее, створа 3 – сильное. Сравнение створов представлено в таблице 13.

Таблица 13

Сравнение С1, С2, С3 по критерию «воздействие на ихтиофауну»

	С1	С2	С3	Вес
С1	1,000	3,000	5,000	0,637
С2	0,333	1,000	3,000	0,258
С3	0,200	0,333	1,000	0,105

Цель «максимизация социально-экономического воздействия» будем характеризовать критерием «перспективы развития». Чем большие возможности для развития района может оказать ГЭС, тем выше оценка по данному критерию.

Охарактеризуем районы возможного строительства ГЭС с позиций социального воздействия. Створ С1 расположен вблизи поселка Усть-Нера. Через поселок проходит федеральная автомобильная дорога М56 «Колыма». В районе находятся богатейшие месторождения золота. Таким образом, строительство ГЭС позволит развить район, даст толчок освоению новых месторождений.

Створ С2 расположен вблизи бывшего поселка Предпорожный. Верхняя граница возможного водохранилища доходит до поселка Усть-Нера. В районе поселка Предпорожный имеются месторождения каменного угля, золота. Кроме того, ГЭС будет располагаться между поселками Усть-Нера и Хонуу, который к 2030 году может стать крупным транспортным узлом. Это позволит влиять одновременно на развитие Усть-Неры и Хонуу.

Створ С3 расположен вблизи поселка Хонуу. В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта в России до 2030 года, планируется строительство стратегической железнодорожной линии Якутск – Мома – Магадан. Поселок Хонуу расположен в устье реки Мома, ниже которого Индигирка судоходна. Третий створ в перспективе оказывается вблизи крупного транспортного узла, что обеспечит большие возможности развития инфраструктуры района.

Таким образом, С2 значительно превосходит С1, умеренно превосходит С3, поскольку позволяет влиять на развитие двух районов (таблица 14).

Цель «минимизация воздействия сейсмической активности» характеризуется критерием «балльность по

шкале MSK-64». Анализируемый район характеризуется повышенной сейсмической активностью. Оценки определялись при помощи карты ОСР-97-С, предназначенной для проектирования и строительства особо ответственных сооружений.

Таблица 14

*Сравнение C1, C2, C3
по критерию «перспектива развития»*

	C1	C2	C3	Вес
C1	1,000	0,200	0,333	0,105
C2	5,000	1,000	3,000	0,637
C3	3,000	0,333	1,000	0,258

Для створа C1 по шкале MSK-64 сейсмическая активность достигает 9 баллов, для C2 – 9 баллов, для C3 – 8 баллов (таблица 15) [7].

Несмотря на высокую сейсмическую активность района, как правило, при детальном сейсмическом микрорайонировании удается выделять участки пони-

женной опасности. К тому же, в настоящее время уже имеется опыт строительства ГЭС в подобных условиях (Токтогульская, Нурекская ГЭС). Кроме того, при строительстве могут проводиться антисейсмические мероприятия.

Таблица 15

*Сравнение C1, C2, C3
по критерию «балльность по MSK-64»*

	C1	C2	C3	Вес
C1	1,000	1,000	0,333	0,200
C2	1,000	1,000	0,333	0,200
C3	3,000	3,000	1,000	0,600

После проведения сравнений альтернатив по соответствующим критериям проведем парное сравнение критериев.

Матрица парных сравнений, а также полученные по выражению (9) показатели веса представлены в таблице 16.

Таблица 16

Матрица парных сравнений критериев

Критерий	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Вес
K1	1,000	0,333	0,250	0,500	0,500	0,200	2,000	0,056
K2	3,000	1,000	0,500	2,000	2,000	0,333	4,000	0,149
K3	4,000	2,000	1,000	3,000	3,000	0,500	5,000	0,232
K4	2,000	0,500	0,333	1,000	1,000	0,250	3,000	0,091
K5	2,000	0,500	0,333	1,000	1,000	0,250	3,000	0,091
K6	5,000	3,000	2,000	4,000	4,000	1,000	6,000	0,345
K7	0,500	0,250	0,200	0,333	0,333	0,167	1,000	0,037

После определения весов критериев и альтернатив при сравнении по соответствующим критериям становится возможным получение многокритериальной оценки альтернатив по выражению (10). Результаты расчета представлены в таблице 17.

Таблица 17

Многокритериальная оценка альтернатив

Альтернатива	Оценка
C1	0,385
C2	0,344
C3	0,271

Итак, с позиций разработанной иерархии целей и критериев, назначенных оценок при парных сравнениях лучшим является створ C1.

Наибольший вклад в оценку створа C1 внесли критерии «гарантированная выработка электроэнергии» и «условия строительства», «воздействие на ихтиофау-

ну». Отрицательные факторы – то, что створ характеризуется высокими площадями затопления, расположен в зоне высокой сейсмичности, потребует сооружения практически в два раза более длинной плотины. Кроме того, при выполнении стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года ГЭС окажется в существенном удалении от стратегической железнодорожной линии Якутск (Нижний Бестях) – Мома – Магадан.

Тем не менее, створ расположен вблизи богатейших месторождений золота. А компенсировать удаленность от Хонуу можно строительством линий электропередачи. Кроме того, в случае срыва сроков строительства железной дороги проект ГЭС вблизи Хонуу может оказаться крайне неэффективным, а строительство ГЭС в створе C1 в меньшей степени зависит от этого фактора.

Строительство ГЭС в створе C3 позволит обеспечить развитие транспортного узла Хонуу, решить вопросы электроснабжения объектов железной дороги при выполнении стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года. Створ обеспечивает наи-

меньшую площадь затопления, длину плотины, расположен в зоне с низкой относительно других створов сейсмичностью. Но по таким критериям, как «гарантированная выработка электроэнергии», «воздействие на ихтиофауну» створ имеет худшие оценки. В результате створ имеет самую низкую многокритериальную оценку.

Таким образом, предложены три возможных пункта строительства ГЭС на реке Индигирка. Проведены водноэнергетические расчеты, которые позволили оценить гарантированную выработку электроэнергии, гарантированную среднесуточную мощность ГЭС при различных отметках НПУ. Для проблемы выбора створа ГЭС на реке Индигирке предложена иерархия целей и критериев. С помощью метода МАИ проведена многокритериальная оценка створов.

Предложенный многокритериальный подход к выбору створов ГЭС может проводиться на ранних этапах инженерных изысканий, когда известны лишь ориентировочные данные в отношении сооружаемой ГЭС. Особенностью подхода является возможность избежать точной оценки альтернатив по критериям, ограничившись лишь выражением превосходства альтернатив по отношению друг к другу. Эта возможность особенно важна в условиях, когда по целому ряду критериев оценка может быть дана в виде набора характеристик, графиков зависимости, словесного описания.

Литература

1. Чистяков Г.Е. Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 255 с.
2. КLIBашев К.П. Гидрологические расчеты / К.П. КLIBашев, И.Ф. Горошков / Л: Гидрометеоздат. 1970. 460 С.

3. Ибад-Заде Ю.А., Азимов С.А., Алескеров В.Г. и др. Динамика наносов в реках и водохранилищах. - М.: Стройиздат, 1978. 244 с.
4. В. П. Корпачев, А. И. Пережилин, А. А. Андрияс, Ю. И. Рябokonь. Загрязнение и засорение водохранилищ ГЭС древесно-кустарниковой растительностью, органическими веществами и влияние их на качество воды. Рос. акад. естествознания, Сиб. гос. технол. ун-т. -М. : Акад. естествознания, 2010. 126 с.
5. СанПиН 3907-85 Санитарные правила проектирования, строительства и эксплуатации водохранилищ.
6. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий/ Т.Л. Саати; пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.
7. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах.

References

1. Chistyakov G.E. Yakutia water resources // Vodnye resursy rek Yakutii. M.: Nauka, 1964. 255 p.
2. Klibashev K.P. Hydrology // Gidrologicheskie rascheti / K.P. Klibashev, I.F. Goroshkov / L: Gidrometeoizdat. 1970. 460 p.
3. Ibad-Zade Yu.A., Azimov S.A., Aleskerov V.G. and other. Rivers and water reservoirs detritus dynamics // Dinamika nanosov v rekah i vodohranilishah. M.: Stroizdat, 1978. 244 p.
4. V. P. Korpachev, A. I. Perejilin, A. A. Andriyas, Yu. I. Ryabokon'. Clogging of hydro power plant water reservoirs by hardy-shrub vegetation, organic substances, impact on water quality // Zagryaznenie i zasorenie vodohranilish GES drevesno-kustarnikovoi rastitel'nost'yu, organicheskimi vesche-stvami i vliyaniye ih na kachestvo vody. Ros. akad. estestvo-znaniya, Sib. gos. tehnol. un-t. - M. : Akad. estestvoznaniya, 2010. 126 p.
5. SanPiN 3907-85 Sanitary design, building and operating regulations // Sanitarnye pravila proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii vodohranilish.
6. Saati T.L. Decision Making. Analysis hierarchy process // Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarhii/ T.L. Saati; per. s ang. M.: Radio i svyaz', 1993. 316 p.
7. SP 14.13330.2011. Building in seismic areas // Stroitel'stvo v seismicheskikh raionah.

УДК

Математическая модель лесного массива в стационарном режиме

Ю.Н. Алпатов¹, Д.В. Ащеулова¹

¹Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: asheylova1984@mail.ru
Статья поступила 20.04.2012, принята 27.09.2012

Настоящая статья посвящена методике получения математической модели лесного объекта в условиях антропогенного воздействия, нахождения оптимальных параметров качества прироста лесного массива. Проведенная в работе идентификация многосвязного объекта на примере исследования лесного массива позволила проанализировать основные факторы функционирования объекта, построить топологическую модель лесного массива. Построение топологической модели объекта на основе структурного графа позволяет выбрать количество неизвестных компонент в системе и определить состояние переменных структуры системы. В процессе моделирования получено однородное матричное уравнение модели, которое полностью отражает функциональную зависимость компонент в структуре и позволяет представить процесс получения уравнения системы из отдельных этапов структурного графа. Этапы построения данной модели представлены в виде последовательных алгоритмов: - структурная схема – таблица взаимодействия параметров – с-граф объекта исследования - матричная модель системы – уравнение системы.

Ключевые слова: многосвязный объект, структурная схема, структурный граф, уравнение системы, матричное уравнение, относительная погрешность, симплекс-метод.