

П. С. Панкратьев, аспирант, e-mail: scud33@inbox.ru,
В. А. Шакиров, канд. техн. наук, доц., e-mail: mynovember@mail.ru,
Братский государственный университет, Россия, Братск

Двухуровневый многокритериальный анализ пунктов строительства гидроэлектростанции

Формализуется проблема принятия решений по выбору пунктов строительства гидроэлектростанции. Проблема отличается необходимостью анализа двух уровней альтернатив — пунктов строительства и вариантов станций, дефицитом информации по альтернативам и многочисленными критериями из оценки. Формулируются требования к методам анализа альтернатив на двух уровнях. Для решения задачи предлагается использовать метод анализа иерархий и метод многокритериальной теории полезности. Предлагается методика решения задачи в такой постановке. Проводится выбор пункта строительства гидроэлектростанции на реке Индигирке.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, теория полезности, метод анализа иерархий, размещение гидроэлектростанции

Введение

Процесс принятия решений по размещению гидроэлектростанций (ГЭС) имеет ряд особенностей. Во-первых, решения по указанной проблеме имеют долговременные социальные, экологические, экономические, биологические последствия, что требует тщательного многокритериального анализа. Во-вторых, анализ проводится в условиях неопределенности исходной информации и будущих условий, так как период времени от начальных этапов проектирования до ввода в эксплуатацию может достигать 15 лет. В-третьих, проблемы размещения ГЭС относятся к слабоструктурированным.

По ряду критериев получение точной количественной оценки не всегда возможно в силу ограниченности финансовых и временных ресурсов, поэтому используют качественные оценки, полученные от экспертов. В силу отмеченных особенностей, других сложностей, присущих системным проблемам, задачу разбивают на этапы. Например, на первом этапе намечаются перспективные пункты строительства ГЭС, на втором этапе уточняется ее мощность, площадка строительства, технические параметры. Этапы рассматриваются отдельно, в результате выбранный на первом этапе вариант решения может иметь набор неэффективных альтернатив на втором этапе. Повторный анализ ведет к сильной нагрузке лица, принимающего решения (ЛПР), потере финансовых и временных ресурсов [1–3], поэтому предлагается уже при выборе пунктов строительства ГЭС учитывать оценки возможных в этих пунктах дальнейших решений.

Постановка задачи

При сравнении пунктов строительства предлагается выделить два уровня

альтернатив. Альтернативами первого уровня (АПУ) являются пункты строительства, альтернативами второго уровня (АВУ) — возможные в пункте варианты ГЭС. Например, одной из важнейших характеристик ГЭС является нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища ГЭС, который определяет мощность станции, капитальные вложения, площадь затопления земель и т. д. Каждый пункт в зависимости от гидрологических характеристик соответствующего района обладает определенным диапазоном возможных НПУ. Именно поэтому при сравнении пунктов целесообразно сразу включить в анализ оценки возможных к реализации вариантов электростанции.

Сформулируем задачу следующим образом. Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ — множество АПУ, которые оцениваются по множеству критериев $F = F_1 \cup G$. Подмножество критериев $F_1 = \{f_1, f_2, \dots, f_s\}$ служит для оценки альтернатив только первого уровня, подмножество критериев $G = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ — для оценки альтернатив и первого, и второго уровней. Каждому элементу a_i множества A ставится в соответствие множество возможных АВУ $B_i = \{b_1, b_2, \dots, b_{im}\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом многокритериальных оценок альтернатив множеств B_i (рис. 1).

Особенностью задачи является то, что выбор лучших АВУ, лучшей АПУ проводится в различных

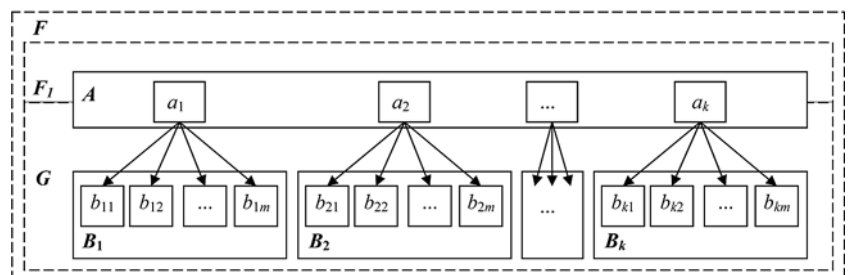


Рис. 1. Двухуровневая структура проблемы выбора пункта строительства ГЭС

условиях — различное число альтернатив, описание критериев, поэтому целесообразно использовать два метода многокритериального анализа.

АВУ, как правило, характеризуется критериями, по которым может быть дана количественная оценка — мощность ГЭС, стоимость ГЭС, площадь затопленных земель. Число альтернатив второго уровня потенциально не ограничено, так как шаг изменения оценки по критериям внутри диапазона может быть выбран очень малым. Соответственно необходим метод, позволяющий проводить многокритериальную оценку в условиях большого числа альтернатив по критериям с количественным описанием. Этим требованиям отвечает метод многокритериальной теории полезности (Multiattribute utility theory (MAUT)). Данный метод широко применялся на практике [4, 5].

АПУ также могут характеризоваться количественными критериями (например, сейсмичность в районе строительства), но в большей степени для описания альтернатив привлекаются критерии, по которым может быть дано только качественное описание, например, условия строительства, перспективы развития района. А по некоторым критериям могут быть даны только сравнительные оценки для альтернатив, например, воздействие на ихтиофауну. Число альтернатив первого уровня, как правило, не превышает 10. Для описанных условий эффективен метод анализа иерархий (МАИ). МАИ также применялся при решении важных практических задач [8].

Таким образом, предлагается следующий подход к выбору пункта для строительства ГЭС (рис. 2). На первом этапе с помощью картографических материалов намечаются пункты (АПУ), в каждом из которых проводятся водноэнергетические расчеты и определяются диапазоны возможных НПУ (АВУ). На втором этапе формируется иерархия целей и критериев с разделением их на две группы — F_1 и G . На третьем этапе для каждого пункта по критериям множества G методом MAUT выбирается лучшая АВУ. На четвертом этапе пункты сравниваются методом анализа иерархий в предположении, что именно лучшая АВУ будет реализована в пункте. При сравнении пунктов используются критерии F_1 и G .

Предлагаемый подход позволяет при сравнении пунктов учесть качество возможных последующих решений, т. е. учесть оценку вариантов станций, которые будут в дальнейшем реализованы.



Рис. 2. Двухуровневый подход к выбору пунктов строительства ГЭС

Пример использования двухуровневого подхода

Рассмотрим предлагаемый подход к многокритериальному выбору наиболее перспективного пункта строительства ГЭС на примере реки Индигирки, протекающей на севере республики Саха (Якутия). Ситуационный план района представлен на рис. 3.

В исследовании будет рассмотрен участок реки, расположенный в перспективных для развития Момском и Оймяконском улусах. Достаточно благоприятные гидрологические условия района, сосредоточение месторождений золота, сурьмы, вольфрама, каменного угля позволяют провести анализ нескольких вариантов строительства ГЭС. На реке Индигирке для анализа было выбрано пять пунктов возможного строительства ГЭС, два из которых — уже были намечены в СССР Институтом физических проблем Севера (ИФТПС СО РАН) [6].

Пункт П1 намечен вблизи поселка Хонуу, расположенного в устье реки Момы. Перспективу поселка определяет стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р, в соответствии с которой запланировано строительство стратегической железнодорожной линии Якутск—Мома—Магадан. Кроме того, от поселка Хонуу Индигирка судоходна. Таким образом, в перспективе поселок может стать крупным транспортным узлом. Рост



Рис. 3. Ситуационный план района

Таблица 1

Результаты водноэнергетических расчетов

Пункт (АПУ)	АВУ	НПУ, м	Среднесуточная гарантированная мощность, МВт	Площадь затопления, км ²
П1 (АПУ 1)	АВУ 11	30	3,601	21,320
	АВУ 12	40	11,771	30,920
	АВУ 13	50	24,843	44,390
	АВУ 14	60	40,265	61,730
П2 (АПУ 2)	АВУ 21	30	1,594	6,760
	АВУ 22	40	10,912	41,650
	АВУ 23	50	28,803	73,000
П3 (АПУ 3)	АВУ 31	30	8,887	50,000
	АВУ 32	40	24,089	79,400
П4 (АПУ 4)	АВУ 41	20	4,594	51,120
	АВУ 42	30	17,644	82,760
	АВУ 43	40	38,136	115,110
	АВУ 44	50	74,860	201,210
	АВУ 45	60	129,735	269,860
П5 (АПУ 5)	АВУ 51	20	4,712	50,800
	АВУ 52	30	16,241	109,450
	АВУ 53	40	41,935	193,550

электрических нагрузок будет обусловлен строительством и обслуживанием железной дороги.

Пункт П2 был намечен ИФТПС СО РАН в горной речной долине у устья реки Луч. Территория является равноудаленной от поселков Предпорожный и Хонуу.

Пункт П3 намечен вблизи поселка городского типа Предпорожный, упраздненного в 2007 г. Вблизи расположены месторождения золота, угля. Расположение между поселками Хонуу и Усть-Нера позволяет влиять на развитие двух районов.

Пункт П4 намечен вблизи поселка городского типа Усть-Нера, расположенного вблизи богатейших месторождений золота, сурьмы, вольфрама. Через поселок проходит федеральная автомобильная дорога Р504 "Колыма", связывающая Якутск и Магадан.

Пункт П5 — второй, намеченный ИФТПС СО РАН, — расположен на территории, богатой месторождениями рудного и россыпного золота.

На первом этапе (см. рис. 2) после формирования АПУ были проведены водноэнергетические расчеты, целью которых является определение возможных площадей затопления, гарантированной выработки электроэнергии и среднесуточной мощности ГЭС [1]. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Последовательность расчетов и промежуточные результаты для трех пунктов приведены в работе [1].

На втором этапе формируется иерархия целей и критериев (рис. 4). На рисунке показано разделение критериев на две группы: К1, К2, К3 — критерии множества G (служат для оценки вариантов ГЭС и пунктов), критерии К4...К7 — критерии множества F_1 (служат только для оценки пунктов).

На третьем этапе исследования проводится выбор лучших АВУ (вариантов ГЭС) для возможных пяти пунктов (П1...П5). Для этого используется метод МАУТ, который имеет аксиоматическое обоснование. При выполнении условий-аксиом математически доказывается, что существует скалярная функция полезности $u(y)$, которая ставит в соответствие каждой альтернативе число, отражающее ее полезность [4]. Выполнение аксиом отражает готовность ЛПР сравнивать, ранжировать альтернативы, ухудшать оценки по одному критерию для улучшения оценки по другому.

Если рассматривается выбор в условиях определенности, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$ [4, 9]. Так как отсутствует объективная или субъективная информация о распределениях вероятности изменения оценок по критериям, будем рассматривать решение задачи в условиях определенности и использовать функцию ценности $v(y)$. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению [4, 9] позволяет получить многокритериальную функцию ценности (МФЦ) в аддитивном виде:

$$v(y) = v(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(y_i),$$

где k_i — шкалирующий коэффициент критерия i ;

$\sum_{i=1}^n k_i = 1$; $v(y_i)$ — однокритериальная функция

ценности (ОФЦ); y_i — оценка АВУ по критерию i .

Для построения однокритериальных функций ценности проводится опрос ЛПР, в ходе которого



Рис. 4. Иерархия целей и критериев проблемы выбора пункта строительства ГЭС

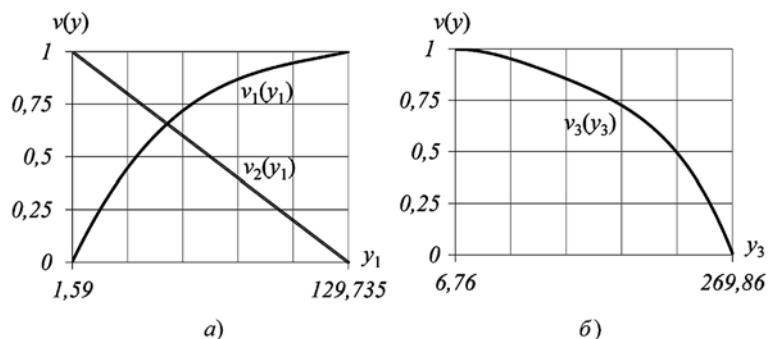


Рис. 5. ОФЦ критериев:
 а — $v_1(y_1)$ — среднесуточная мощность ГЭС, МВт; $v_2(y_1)$ — стоимость строительства ГЭС, о.е., б — $v_3(y_3)$ — площадь затопляемых земель, км²

определяется ценность $v(y_i)$ для всего возможного диапазона критериальных оценок y_i . Построенные ОФЦ представлены на рис. 5. Стоимость строительства ГЭС определялась из соотношения 200 тыс. руб. за 1 кВт, поэтому ОФЦ, устанавливающая ценность для вариантов мощности, $v_1(y_1)$ и ОФЦ, устанавливающая ценность для стоимости ГЭС, $v_2(y_1)$ построены от одной переменной y_1 — среднесуточной мощности ГЭС.

Далее, в ходе диалоговых процедур [4, 5] устанавливаются отношения важности между критериями и решается система уравнений. В результате определяются шкалирующие коэффициенты k и многокритериальная функция ценности:

$$v(y_1, y_2, y_3) = k_1 v_1(y_1) + k_2 v_2(y_1) + k_3 v_3(y_3).$$

В исследовании получена МФЦ:

$$v(y_1, y_2, y_3) = 0,403v_1(y_1) + 0,481v_2(y_1) + 0,116v_3(y_3).$$

С помощью МФЦ могут быть ранжированы все варианты ГЭС для каждого пункта. На рис. 6 представлены графики зависимости площади затопления земель от среднесуточной мощности анализируемых пяти пунктов. На рисунке также отображены линии фиксированной ценности, вычисленной с помощью полученной МФЦ для всех значений ОФЦ. Из рисунка видно, какие АБУ достигают наибольшей ценности для каждого пункта; они и будут отображены для третьего этапа сравнения АПУ: для пункта 1 — вариант ГЭС с НПУ 60 м, для пункта 2 — 50 м; пунктов 3, 4, 5 — 40 м.

На четвертом этапе применяется метод анализа иерархий. Метод использует относительную шкалу сравнения (табл. 2) [7].

В соответствии с методом анализа иерархий ЛПР проводит попарные сравнения альтернатив по критериям с помощью шкалы относительной важности, формируя матрицы парных сравнений. Для этого попарно сравниваются альтернативы из строки с каждой альтернативой из столбца (табл. 3). Оценки шкалы относительной важности c_{ij} вписываются в ячейки, образованные пересечением соответствующей строки и столбца.

Так формируются матрицы парных сравнений альтернатив. Затем аналогично проводится парное сравнение критериев, формируется матрица парных сравнений критериев [7]. Вычислив собственные векторы матриц парных сравнений и проведя нормирование элементов собственных векторов, можно получить веса критериев и альтернатив. Определение собственного вектора матрицы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ проводилось по известному выражению [7]

$$\lambda_i = \frac{1}{n} \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}},$$

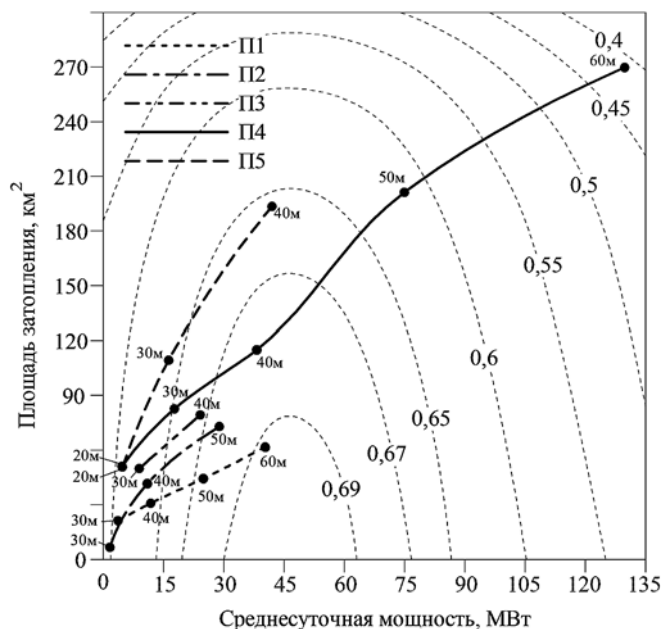


Рис. 6. Зависимости площади затопления от среднесуточных мощностей для каждого пункта и линии фиксированных многокритериальных значений ценностей

Таблица 2

Шкала относительной важности

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

Таблица 3

Заполнение матрицы парных сравнений

Критерии	f_1	f_2	...	f_s
f_1	1	c_{12}	...	c_{1s}
f_2	c_{21}	1	...	c_{2s}
...	1	...
f_s	c_{s1}	c_{s2}	...	1

Таблица 4

Матрица парных сравнений по критерию "Среднесуточная мощность ГЭС"

Пункт	П1	П2	П3	П4	П5	Вес
П1	1	7	8	3	0,500	0,310
П2	0,143	1	2	0,200	0,125	0,048
П3	0,125	0,500	1	0,167	0,111	0,033
П4	0,333	5	6	1	0,250	0,154
П5	2	8	9	4	1	0,456

Таблица 5

Матрица парных сравнений критериев

Критерий	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Вес
K1	1	2	3	0,500	5	0,500	5	0,179
K2	0,500	1	2	0,333	4	0,333	4	0,116
K3	0,333	0,500	1	0,250	3	0,250	3	0,076
K4	2	3	4	1	6	1	6	0,280
K5	0,200	0,250	0,333	0,167	1	0,167	1	0,036
K6	2	3	4	1	6	1	6	0,280
K7	0,200	0,25	0,333	0,167	1	0,167	1	0,036

Таблица 6

Оценки альтернатив

Альтернатива	Оценка
АПУ1 (П1)	0,293
АПУ2 (П2)	0,104
АПУ3 (П3)	0,145
АПУ4 (П4)	0,209
АПУ5 (П5)	0,250

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 — число альтернатив или критериев.

Вес критерия w_i или альтернативы v_{ij} определяется путем нормирования элементов собственного вектора. Например, вес критерия определяется формулой

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

Оценки альтернатив с учетом всех критериев получают по выражению

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij} \quad (2)$$

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

При сравнении АПУ по критериям "Среднесуточная мощность ГЭС", "Стоимость строительства", "Площадь затопления" участвуют выбранные ранее

лучшие АБУ. Пример матрицы парных сравнений АПУ по критерию "Среднесуточная мощность ГЭС" и полученные по формуле (1) веса представлены в табл. 4. Аналогично проводилось сравнение АПУ по критериям K4—K7.

Матрица парных сравнений критериев, а также полученные по выражению (1) веса представлены в табл. 5. Многокритериальные оценки альтернатив, полученные по выражению (2), представлены в табл. 6.

Анализ полученных результатов

Итак, с позиций разработанной иерархии целей и критериев, назначенных оценок при парных сравнениях лучшим является пункт П1.

Строительство ГЭС в пункте П1 позволит обеспечить развитие транспортного узла Хонуу, решить вопросы электроснабжения объектов железной дороги при выполнении стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 г. Пункт обеспечивает наименьшую площадь затопления, в то же время сравнительно высокую по сравнению с конкурентными вариантами мощность (вторую по величине), расположен в зоне с низкой относительно других створов сейсмичностью. Но по такому критерию как "Воздействие на ихтиофауну" пункт имеет худшую оценку. Низкая оценка альтернативы и по стоимости строительства. Тем не менее, с учетом выраженных предпочтений, пункт П1 имеет самую высокую многокритериальную оценку.

Также высокую оценку получил пункт П5, имеющий высокие перспективы для развития района, богатого месторождениями цветных и благородных металлов. Пункт имеет наименьшее воздействие на ихтиофауну, лучший вариант ГЭС по мощности. Однако пункт имеет низкую сравнительную оценку по условиям строительства, стоимости ГЭС, самую низкую оценку по площади затопления среди рассматриваемых на втором уровне альтернатив.

Заключение

Новизна предлагаемого подхода заключается в многокритериальном рассмотрении проблемы на двух уровнях с соответствующим формированием двух уровней альтернатив. Каждая альтернатива первого уровня может иметь возможные реализации в виде альтернатив второго уровня. Альтернативы первого и второго уровней имеют различную степень детализации описаний последствий по критериям, что требует применения различных подходов к многокритериальной оценке. Предложена методика для решения задачи в такой постановке.

Предложенный многокритериальный подход к выбору пунктов ГЭС может проводиться на ранних этапах инженерных изысканий, в предпроектных исследованиях, когда известны лишь ориентировочные данные в отношении сооружаемой ГЭС,

в целях определения наиболее предпочтительных мест для дальнейшего, более детального анализа. Особенностью подхода является возможность избежать точной оценки альтернатив по некоторым критериям, ограничившись лишь выражением превосходства альтернатив по отношению друг к другу.

Список литературы

1. Панкратьев П. С., Шакиров В. А. Многокритериальный выбор створа гидроэлектростанции на реке Индигирке в республике Саха (Якутия) // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3 (15). С. 71–80.
2. Шакиров В. А., Панкратьев П. С. Многокритериальный двухуровневый подход к выбору лучшей альтернативы в рамках слабоструктурированной проблемы // Вестник Воронежского

государственного университета. Сер. "Системный анализ и информационные технологии". 2013. № 2. С. 118–127.

3. Шакиров В. А., Панкратьев П. С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6(48). С. 111–121.
4. Кини Р. Л., Райф Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ. / Под ред. И. Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. 580 с.
5. Кини Р. Л. Размещение энергетических объектов: выбор решений: Пер. с англ. М.: Энергоматиздат, 1983. 320 с.
6. Ноговицын Д. Д. Водные ресурсы Якутской АССР и их использование. Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1985. 124 с.
7. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.
8. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах.
9. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

P. S. Pankratiev, Post Graduate Student, e-mail: scud33@inbox.ru,
V. A. Shakirov, Assistant Professor; e-mail: mynovember@mail.ru,
Bratsk State University, Russia, Bratsk

Two-Level Multiattribute Analysis of Hydroelectric Station Sites

In this paper, decision-making problem of choice of hydroelectric station sites is formalized. The problem characterized by the need to analyze two alternative levels, which are sites and variants of stations, by shortage of information on alternatives and multiple criteria. Requirements for methods of alternative analysis for two levels are formulated. To solve the problem analytic hierarchy process and multi-attribute utility theory are provided. A method of solving the problem in such a setting is provided. Siting of hydroelectric power plant on the Indigirka River is performed.

Keywords: multiattribute analysis, utility theory, analytic hierarchy process, siting of hydroelectric station

References

1. Pankrat'ev P. S., Shakirov V. A. Mnogokriterial'nyi vybor stvora gidroelektrostantsii na reke Indigirke v respublike Saha (Jakutija). *Sistemy. Metody. Tehnologii*. 2012. N. 3(15). P. 71–80.
2. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. Mnogokriterial'nyi dvuhurovnevyy podhod k vyboru luchshej al'ternativy v ramkah slabostrukturirovannoj problemy. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii"*. 2013. N. 2. P. 118–127.
3. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. Podderzhka prinjatja reshenij na stadii predproektnyh issledovanij na osnove dvuhurovnevnogo mnogokriterial'nogo analiza. *Prikladnaja informatika*. 2013. N. 6(48) 2013. P. 111–121.

4. Kini R. L., Raifa H. *Prinjatje reshenij pri mnogih kriteriiah: predpochtenija i zameshhenija*: Per. s angl. Pod red. I. F. Shahnova. M.: Radio i svjaz', 1981. P. 580.
5. Kini R. L. *Razmeshhenie jenergeticheskij ob'ektov: vybor reshenij*: Per. s angl. M.: Jenergomatizdat, 1983. P. 320.
6. Nogovicyn D. D. *Vodnye resursy Jakutskoj ASSR i ih ispol'zovanie*. Jakutsk: izd JaF SO AN SSSR, 1985. P. 124.
7. Saati T. L. *Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij*: Per. s angl. M.: Radio i svjaz', 1993. P. 316.
8. СП 14.13330.2011. *Stroitel'stvo v sejsmicheskijh rajonah*.
9. Chernoruckij I. G. *Metody prinjatija reshenij*. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 416 p.