Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2020, №1, Том 7 / 2020, No 1, Vol 7 <https://resources.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/11INOR120.pdf>

DOI: 10.15862/11INOR120 (<http://dx.doi.org/10.15862/11INOR120>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Родригес В.С., Мокрова Н.В. Многокритериальная оценка альтернатив территориального планирования при строительстве плотин с использованием технологий географических информационных систем // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020 №1, <https://resources.today/PDF/11INOR120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11INOR120

For citation:

Rodriguez V.S., Mokrova N.V. (2020). Multi-criteria assessment of territorial planning alternatives using geographic information system technologies for dam construction. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online] 1(7). Available at: <https://resources.today/PDF/11INOR120.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/11INOR120

УДК 004.942; 627.22

ГРНТИ 28.17.19

Родригес Васкес Соланхель

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Аспирант
E-mail: solrusita85@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6250-1108>

Мокрова Наталия Владиславовна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Профессор
Доктор технических наук, доцент
E-mail: mokrovanv@mgsu.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8444-2935>

**Многокритериальная оценка альтернатив
территориального планирования при строительстве
плотин с использованием технологий географических
информационных систем**

Аннотация. Территориальное планирование при выборе участков водосбора необходимо для увеличения доступности водных ресурсов. Однако изменения в землепользовании иногда происходят без учета особенностей территории, что может привести к воздействию на окружающую среду. С учетом многоцелевого использования, масштабных целей и проектов, присутствия частных интересов задача становится более актуальной, при этом отсутствуют взаимосвязанные данные, существует взаимовлияние инфраструктуры необходимые для правильного планирования и проектирования гидротехнических объектов. Идентификации подходящих областей для определенных методов сбора и удержания воды с использованием прогрессивных методов в геоматике, остаётся одной из важных целей данной разработки и диссертационного исследования автора. В настоящем исследовании основное внимание уделяется анализу моделей, взаимосвязанных с геоинформационными системами, и методов многокритериального анализа, используемых при принятии решений о локализации

площадей для строительства плотин. Анализируются парадигмы рациональности, предложенные для принятия сложных решений, и устанавливаются рамки, в соответствии с которыми теоретические разработки многокритериального анализа могут обеспечить большую практическую значимость. Автором критически проанализированы различные подходы и теоретические исследования рассматриваемой тематики. На основе проведенного исследования удалось сделать вывод, что комбинация «метод многокритериального анализа – геоинформационная система» имеет потенциал обеспечения рационального, объективного и непредвзятого подхода к принятию решений при идентификации потенциальных областей при планировании строительства гидросооружений, а также необходимость интеграционного компонента, который позволит ускорить принятие решение при локализации потенциальных областей с учетом основных факторов, в том числе экологических и социальных.

Ключевые слова: многокритериальный анализ; строительство плотин; геоматика; локализации области водосбора; геоинформационная система

Введение

Наличие водных ресурсов, в частности для орошения и домашнего использования, особенно в регионах с ограниченным балансом, составляет большую и серьёзную проблемой. Это обуславливает необходимость сбора и максимально возможного использования водных ресурсов в бассейне рек. Правильное планирование и выбор технологии организации водосбора может быть единственно оптимальным решением при низкой доступности водных ресурсов в различных регионах, особенно где нехватка воды для потребления является сдерживающим фактором развития инфраструктуры, в том числе в случае загрязнения поверхностных и подземных вод, а также принятии неверных решений при управлении ресурсами.

Известны технологии строительства гидросооружений сооружений: водосборных плотин, водохранилищ, фильтрующих и переливных (катастрофического действия) и др. Некоторые из них могут являться страховочным механизмом, который действует как барьер при изменении уровня осадков [1]. Гидротехнические сооружения являются одним из важных компонентов развития водосборных бассейнов, которые также могут быть использованы для пополнения грунтовых вод [2]. Подобные сооружения требуют дорогостоящих инвестиций, и поэтому крайне важно определить правильное их расположение. Планирование и принятие решений при организации систем водообеспечения с использованием методов дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС) чрезвычайно важны для предотвращения значительных инвестиций [3].

Применение ГИС для анализа гидрографических бассейнов рентабельно, требует незначительного времени, позволяет манипулировать географическими ссылочными данными лицам, принимающим решения, является отличным инструментом для выбора наилучших мест для схем сбора водорегуляции водосбора. Физические и гидрологические аспекты водосбора исследованы с помощью геоинформационных систем и гидрологического моделирования. Srivastava в [4] отметил, что для небольших мелиорационных водохранилищ, выбор участка основан на гидрологических, топографических и социально-экономических соображениях. Vorhauer и Hamlett [5] использовали данный подход для локализации оросительных прудов для сельскохозяйственного использования. Критерии отбора участков, используемые в их исследованиях, включают анализ грунтов и пригодность рельефа, текущий почвенный покров и условия землепользования в конкретном районе.

Nisar Ahamed, Gopal Rao и Murthy [6] разработали алгоритм на основе ГИС, чтобы определить местоположение точек водозабора при определении возможных площадок размещения водохранилища для небольших бассейнов. Исследователи использовали

дренажную карту и сетку ЦМР (Цифровая модель рельефа) в качестве входных данных. Baban и Wan-Yusof [7] разработали, применили и оценили критерии выбора площадки с учётом гидрологии и гидравлики, топографии, геологии, экономики и экологических последствий для выбора подходящих месторождений в широкомасштабных тропических условиях с помощью дистанционного зондирования и ГИС, результаты могут быть использованы в качестве инструмента помощи лицу принимающему решения. Forzieri, Gardenti, Caparrini и Castelli [8] использовали ГИС в качестве инструмента для предварительного выбора подходящих участков при строительстве небольших подземных плотин в засушливых районах региона Кидаль, Мали. Chang, Parvathinathan и Breeden [9] комбинировали ГИС и диффузную многокритериальную оценку для выбора мест захоронения отходов в быстрорастущем городском регионе в долине Рио-Гранде-Баго, штат Техас, США.

Kallali, Anane, Jellali и Tarhouni [10] использовали многокритериальный анализ на основе ГИС для определения возможных мест пополнение сточных водоносных горизонтов в северо-восточной части Туниса. Gemitzi, Tsihrintzis, Christou и Petalas [11] использовали ГИС при проектировании стабилизационных прудов для очистки бытовых сточных вод в Греции. Использование ГИС для планирования схемы сбора воды было также изучено в работах [2; 12; 13]. Эти исследователи использовали ГИС для выбора подходящих участков и схем водосбора (пруды и плотины) в различных частях мира. Были использованы различные слои ГИС, включая землепользование, дороги, топографию и анализ почв.

Методы

Принятие решений о землепользовании само по себе, является проблемой многокритериального решения. По этой причине метод многокритериального анализа выбран за основу в диссертационном исследовании автора и применим для поддержки процесса принятия решений путем анализа пригодности почвы для размещения гидротехнических сооружений, в частности. В научной литературе существуют различные попытки классифицировать методы многокритериального решения различными авторами [14–18]. Большинство из них согласно с тем, что аддитивные правила принятия решений (взвешенная сумма критериев; анализ соответствия; процесс иерархического анализа (Analytic Hierarchy Process, АНР)), являются наиболее известными и широко используемыми методами принятия решений с несколькими атрибутами и могут быть использованы в процессе принятия решений на основе ГИС.

Одной из критических проблем в использовании многокритериальных методов является необходимость присвоения весов критериям. Существует большое разнообразие методов аппроксимации для выполнения такого назначения [16], хотя вероятно, наиболее известным является АНР. Другим требованием методов (Multiple-criteria decision analysis, MCDA) является присвоение значения критериям, что в большинстве случаев субъективно. Информация, которая была непосредственно захвачена, часто справедливо считается более надежной, чем информация, которая была оценена, интерполирована, извлечена с карты или просто интерпретирована. По этой причине способ получения информации, связанный с критериями, играет важную роль [19].

Рассмотрим ряд шагов многокритериального анализа, которые приводятся в вышеупомянутых исследованиях.

1. Определение факторов анализа с экологическими и социально-экономическими компонентами.

На этом этапе проводится выбора критериев, которые, по мнению специалистов, наиболее удобны для проведения анализа и правильного выбора потенциальных площадок для строительства гидросооружений.

2. Нормализация критериев с присвоением значения каждой альтернативе в соответствии с установленным правилом.

При многокритериальном анализе важно приступить к нормализации различных рассматриваемых критериев [20]. Следует иметь в виду, что в большинстве случаев при принятии решений единицы измерения критериев различны. Для нормализовать каждого из критериев используется формула:

$$\text{Нормализация} = \frac{\text{значение_критерия}}{(\text{значение_лучше} - \text{значение_хуже})} \quad (1)$$

3. Определение веса критериев или их относительной значимости.

Каждый критерии может иметь различную важность для принятия решений. Это приводит к необходимости получить вес или показатели относительных предпочтений по одним критериям по сравнению с другими [20]. Самый простой способ решения этой задачи заключается в классификации критериев в порядке важности. То есть, если имеем n критериев, число 1 присваивается критерию, который считается наиболее важным, то число 2 будет присвоено следующему критерию по важности и, таким образом, до тех пор, пока число n не будет присвоено критерию, который считает наименее важным. Веса могут быть получены из выражения:

$$W_j = \frac{1/r_j}{\sum_{i=1}^n 1/r_j} \quad W_j = \frac{1/1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = 0.48 \quad (2)$$

где r_j – место или положение, которое занимает j -й критерий в классификации, установленной центром принятия решений. Для взвешивания различных факторов при многокритериальном анализе, наиболее важными критериями будут считаться те, которые имеют самые высокие уровни важности.

4. Получение модели поддержки принятия решений, которая может определять совместимые альтернативы, и этом случае не будет проблем, но может случиться так, что цели конфликтуют друг с другом.

Методы многокритериального анализа

Многокритериальный анализ широко используется на практике, т. к. рассматривает множественные варианты правильного выбора решений путем построения области альтернатив, последовательного обобщения критериев и их реализации. Противоречивость реальных задач, субъективный анализ требуют строительства согласованных схем (моделей), развитие методов исследования операций, разработка методологии MCDA предлагают аппарат выбора оптимальных решений.

Разработан ряд методов, которые, среди прочего, зависят от конкретных границ и условий применения, временных ограничений и имеющихся данных, отличаясь друг от друга главным образом формой обработки информации. Однако, ни один из них не заменяет другого, зачастую единственно возможным является их совместное использование [21]. Поэтому при выборе используемой модели необходимо учитывать такие факторы, как: количество лиц, принимающих решения, этапы принятия решений, допустимость риска, неопределенность,

допустимые вычислительные ресурсы, наличие определенного опыта, а также единицы и масштаб измерения критериев. Кроме того, основой правильного выбора является определение количества целей, которые должны быть решены в исследовании [22].

- *Взвешенная линейная комбинация (ВЛК)*

Взвешенное линейное суммирование является одним из методов, наиболее часто используемых для принятия много атрибутных пространственных решений. Такие аддитивные и компенсационные методы основаны на концепции средневзвешенного значения [23].

Как упоминает [24], данный метод характеризуется простотой и удобством применения. Для расчёта общей оценки для каждой из альтернатив необходимо применить уравнение, которое представляет собой сумму результата умножения значения каждого критерия на его вес:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot v_j) \quad (3)$$

где: r_i – степень адекватности альтернативы i ,

w_j – вес критерия j , где $\sum_{j=1}^n w_j = 1$,

v_j – взвешенное значение альтернативы i по критерию j .

После расчёта степени адекватности можно классифицировать альтернативы, а затем выбрать ту, которая получила лучшую общую оценку. Этот метод легко может быть реализован в ГИС.

- *Процесс иерархического анализа (АНР)*

Анализ иерархии – метод решения проблем многокритериального анализа, в котором каждая проблема проходит процесс деструктуризации и иерархического повторного расположения её основных компонентов. Общее аналитическое решение используется для создания иерархии вложенных альтернатив, в которой каждая задача раскладывается на ряд подчиненных. Иерархическая структура должна отвечать определенным целям. Альтернативы представляют собой абстракцию структуры анализируемой системы, которая позволяет лучше понять функциональные отношения между компонентами и влияние на систему каждой из них [25]. Процесс анализа не требует числовых значений для связывания критериев в альтернативу, представляющую какой-либо из аспектов проблемы, и позволяет использовать субъективные суждения, не поддающиеся измерениям для установления относительной важности критериев в соответствии с общей целью. Такие субъективные суждения используются для количественного определения относительной важности критериев при принятии решений и выборе вариантов [26].

Одним из важных аспектов является определение весов, отражающих относительную важность каждого варианта в задаче решения с несколькими атрибутами. Saaty [25] ввел использование матрицы парного сравнения (МПС) в АНР. МПС позволяет лицу, принимающему решения, назначать сравнительное значение каждой из пар критериев, в результате чего матрица, содержащая сравнительные значения для каждой пары критериев, преобразуется в вербально-числовую со значениями от 1 до 9 (табл. 1). Расчёт МПС устанавливает относительную важность каждого элемента в каждой ветви иерархического дерева.

Таблица 1

**Фундаментальная вербально-числовая шкала
относительной предпочтительности критериев, предложенная Саати [27]**

Интенсивность относительной важности	Качественное определение относительной важности	Объяснения
1	Равная важность	Равный вклад двух видов деятельности в цель
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному виду деятельности над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному виду деятельности над другим
7	Значительное превосходство	Одному виду деятельности дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного вида деятельности над другим подтверждается наиболее сильно
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одного вида деятельности с другим получено одно из вышеуказанных чисел, то при сравнении второго вида деятельности с первым получим обратную величину	

В матрице сравнения существует взаимность между элементами, расположенными выше и ниже диагонали в МПС, как показано на примере в таблице 2 (матрица обратных отношений). В этом примере, критерий А имеет большую важность по отношению к критерию В, иначе А в три раза предпочтительнее, чем В, и следовательно, важность В составляет 1/3 от важности А.

Таблица 2

Матрица парного сравнения

	А	В	С
А	1	3	8
В	0.33	1	5
С	0.125	0.20	1

Из [16] известно, что одним из методов взвешивания критериев является:

1. суммирование значений для каждого столбца МПС;
2. нормализация МПС, делением каждой ячейки матрицы на сумму элементов столбца;
3. вычисление среднего значения в каждой строке нормализованной матрицы.

Таблица 3 содержит шаги для определения относительных весов из МПС на основе табл. 2.

Таблица 3

Матрица парного сравнения

Шаг	а.			МПС		
Критерий	А		В		С	
А	1		3		8	
В	1/3		1		5	
С	1/8		1/5		1	
Шаг	б.		Нормализованная МПС			
Критерий	А		В		С	
А	0.687		0.714		0.571	
В	0.226		0.238		0.357	
С	0.085		0.048		0.071	
Шаг	в.		Расчёт среднего значения			
Критерий			Вес			
А			(0.687+0.714+0.571)/3 = 0.657			
В			(0.226+0.238+0.357)/3 = 0.273			
С			(0.085+0.048+0.071)/3 = 0.068			

Когда количество сравниваемых элементов в МПС увеличивается, становится сложнее контролировать согласованность в предпочтениях, но АНР не требует идеальной согласованности, принимая значение несоответствия 10 % или ниже. Rushton [28] обсуждает причины несоответствия, а Malczewski [16] описывает, как оценивается степень согласованности.

Необходимо учитывать веса, полученные из МПС каждого уровня в иерархии, для которых наиболее часто используемым методом является взвешенная линейная комбинация или аддитивные взвешенные значения.

• *Методика определения предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS)*

Это компенсационная методика сравнения набора альтернатив путем определения весов для каждого критерия, нормализации оценок для каждого критерия и вычисления геометрического расстояния между каждой альтернативой и идеальной альтернативой, которая является лучшей оценкой по каждому критерию.

В работе [29], упоминаются шаги, предложенные [14] и [16]:

1. определение набора альтернатив;
2. нормализация;
3. взвешивание;
4. определение положительного идеального решения (идеальной точки);
5. определение отрицательного идеального решения (анти-идеальной точки);
6. расчёт расстояния до идеальной точки;
7. расчёт расстояния до анти-идеальной точки;
8. определение коэффициента подобия.

Уравнения применения этого метода:

$$d_p^M(a_i^+) = \left[\sum_{j=1}^n w_j |v_j^M - v_{ij}|^p \right]^{1/p} \quad (4)$$

$$d_p^m(a_i^-) = \left[\sum_{j=1}^n w_j |v_j^m - v_{ij}|^p \right]^{1/p} \quad (5)$$

$$D_p(a_i) = \frac{d_p^m(a_i)}{d_p^M(a_i) + d_p^m(a_i)} \quad (6)$$

где: $d_p^M(a_i^+)$ – расстояние до идеальной точки определенной альтернативы (i),

$d_p^m(a_i^-)$ – расстояние до анти-идеальной точки определенной альтернативы (i),

w_j – вес критерия (j),

v_j^M – максимальное нормализованное значение критерия j ,

v_j^m – минимальное нормализованное значение критерия j ,

v_{ij} – нормализованное значение определенной альтернативы (i) критерия j ,

p – расстояние, для $p = 1$ (Манхэттен¹) и $p = 2$ (Евклид²).

В результате применения этих уравнений получены значения в интервале между 0 и 1, из которых близкие к 1, будут приняты в качестве репрезентативных при выборе альтернативы.

Применение этого метода сталкивается с дилеммой работы с идеалом точки или анти-идеалом, выбор которых определяет конечный результат [14].

Результаты

Методы многокритериального анализа сопровождаются процессом выбора переменных и их оценки и основаны на постепенном уточнении критериев, корректировки суждений, анализе реальных альтернатив, их сравнении с конкретными характеристиками. Использование многокритериального анализа может решить проблемы пространственного проектирования и имеет преимущества перед другими типами систем принятия решений. Сложность его применения к оценке принятой к использованию территории проявляется в том случае, когда территория велика и сама является альтернативой взвешиванию при принятии решения. Трудность подразумевается не в методах многокритериальной оценки, а в требуемой обработке географической информации. Поэтому желательно, чтобы число факторов было небольшим или чтобы они были обобщены в очень четко определенных критериях. При этом среди них может существовать "исключающий" фактор (ограничение), рассматривающий ту часть территории, на которой не может развиваться рассматриваемая деятельность.

Преимущества использования этих методов в сочетании с ГИС заключаются в возможности учитывать взаимосвязи различных рассматриваемых территорий. Любой атрибут, содержащийся в каждом из информационных слоев ГИС, может быть взвешен и оценен как положительный или отрицательный фактор для реализации определенной цели. Он также может быть оценен в сочетании или в зависимости с другими факторами и в зависимости от этого противопоставлен, усилен или отменен. Полезность этих процедур очевидна, и сфера применения многокритериальной оценки в сочетании с ГИС для оценки принимающей способности территории очень обширна.

¹ Сумма абсолютных разностей двух координат.

² Расстояние, измеряемое между двумя точками.

Рисунок 1. Интеграция MCDA и ГИС

Ранее исследованные подходы не основаны на выявлении потенциальных мест для строительства гидротехнических сооружений, а скорее указывают область в целом для локализации проектируемых водоемов. Они предлагают использовать проприетарные программные продукты, такие как ArcGIS, GISILWIS, ArcView, ArcMap и другие, в которых вся работа выполняется вручную с использованием набора функций и компонентов, присутствующих в них. В некоторых случаях программные продукты и инструментарий предназначены для определенных типов плотин, соответствующих лишь узкому кругу конкретных целей, а также не учитываются экологические или социальные факторы, а во многих случаях важнейшие задачи предотвращения наводнений.

Как предлагает автор в [30] одним из наиболее разрушительных факторов, которые необходимо учитывать, является предотвращение наводнений из-за опасностей их непредсказуемости. Возможные причины внезапного наводнения – чрезмерное количество осадков, внезапный выброс воды из-за прорыва плотины и пр., что влечёт за собой социальные, экологические, промышленные, экономические и другие виды проблем.

Таким образом, можно еще раз подчеркнуть важность применения вычислительных методов, а также важность создания специализированного, доступного и открытого инструмента, который позволит упростить процесс принятия решений и планирования в гидрологической отрасли. Это позволит обоснованно сформировать важные факторы, спроектировать потенциальные участки, что, в свою очередь, позволит добиться лучших результатов при строительстве плотин и их последующем использовании.

Преимущества разрабатываемых многокритериальных методов автоматизированного принятия решений при проектировании гидротехнических сооружений следующие:

- Организация целенаправленного воздействия, позволяющего без ущерба для окружающей среды организовать мелиоративные мероприятия; эффективное использование водных ресурсов в хозяйственных нуждах, в частности для снабжения населения.
- Создание локальных целевых плотин не только поддерживает животноводство или сельскохозяйственную деятельность, но и обладает функцией защиты от наводнений, организуя водосбор.

- Эффективность (во времени и/или в пространстве) многокритериальных методов оценки зависит от количества используемых критериев. Автоматизированная система выбора альтернатив при проектировании будет работать быстрее, и будет способна предоставить потенциальные площадки для строительства плотин.
- Возможность моделирования гидросооружений, корректировки решений с точки зрения специалистов гидравликов, проведенного технико-экономического обоснования, и окончательного принятия решений о выборе наиболее подходящих для строительства плотины участков бассейна рек.
- Предотвращение принятия неправильных решений при строительстве плотин в неподходящих районах, которые могут привести к наводнениям и, следовательно, к повреждению промышленных, сельскохозяйственных угодий или населенных районов.

Можно констатировать, что с одной стороны в библиографии сообщается о различных подходах, направленных на улучшение локализации потенциальных районов, с другой – существующие подходы по-прежнему имеют определенные ограничения и зачастую оказываются неэффективными с точки зрения их применения при принятии решений. Это приводит к необходимости поиска новых альтернатив для улучшения результатов отбора [2; 31], такие как повышение степени абстракции базовых критериев, новые методы их кодирования [32; 33], или сосредоточить внимания на методах многокритериальной оценки [34; 35].

Обсуждение

Большое количество и актуальность предложений по методам выбора потенциальных областей для промышленного использования земель, доступных в литературе, показывает, что эта тема представляет собой очень активную область исследований. Проведенное исследование подтверждает, что конкретные местные проектные решения характеризуются эффективностью и результативностью на основе данных об их применении. Однако каждое из них имеет определенные ограничения – особенно связанные с потерей контекстной информации, которые ограничивают его область применения. Поэтому необходимо создать методы и обновить модели выбора потенциальных площадок для строительства плотин с целью улучшения результатов в каждом конкретном случае.

В целях облегчения обработки информации, ускорения расчетов, особенно при выборе альтернатив на основе множества критериев, а также возможности анализа графической информации, использования данных географической информационной системы, вывода результатов в цифровой и графической форме при проектировании объектов гидротехнического строительства, исследуемая проблема считается своевременной. Интеграция методов вычислительного пространственного анализа с ГИС облегчает моделирование, поскольку ускоряет пространственный анализ переменных и параметров, позволяя объединять распределенные и агрегированные данные. Кроме того, использование ГИС позволяет выполнять операции по обработке изображений с помощью космического дистанционного зондирования, такие как снимки со спутника LANDSAT, информацию, полученную с датчика Thematic Mapper. С помощью такого анализа можно сделать выводы о возможном ущербе наводнений и определить приоритеты применяемых корректирующих мер, оценить вероятный максимальный путь в бассейне или метеорологические параметры, представляющие гидрологический интерес.

По этим причинам разработка методов многокритериальной оценки, которые учитывают корректировку начальных этапов предварительного анализа и позволяют выбирать

места, обладающие наибольшим потенциалом при территориальном планировании объектов строительства и решении гидротехнических задач, является актуальной задачей. В этом смысле реализация методов отбора всех потенциальных участков для плотин в регионе имеет жизненно важное значение для обеспечения их потенциальной значимости при одновременном снижении размерности обрабатываемых при проектировании данных. Применение разрабатываемого метода возможно в целях повышения эффективности и предотвращения принятия необоснованных решений при планировании и строительстве гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паиен Х., Фаурес Х.-М., Валлее Д. Небольшие водохранилища и хранение воды для сельского хозяйства мелких фермеров. Случай нового подхода // Report. 2012. Том. 3, № Сентябрь. Стр. 1–60. DOI: 10.21955/GATESOPENRES.1115486.1.
2. Ахмад И., Берма М.К. Применение процесса аналитической иерархии в планировании водных ресурсов: основанный на ГИС подход к выявлению подходящих участков для хранения воды // J. Water Resour. Manag. 2018. Том. 32, № 15. Стр. 5093–5114. DOI: 10.1007/s11269-018-2135-x.
3. Сингх Х.П., Сингх Д., Литория П.К. Выбор подходящих участков для структур сбора воды в бассейне Соанкхад, Пенджаб, с использованием подхода дистанционного зондирования и географической информации (ДЗ & ГИС), тематическое исследование // J. Indian Soc. Remote Sens. Springer-Verlag, 2009. Том. 37, № 1. Стр. 21–35. DOI: 10.1007/s12524-009-0009-7.
4. Сривастаба Р.К. Методология оптимизации проектирования интегрированной системы орошения резервуаров // J. Water Resour. Plan. Manag. 1996. Том. 122, № 6. Стр. 394–402. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:6(394).
5. Ворхауер К.Ф., Хамлетт J.M. ГИС: Инструмент для поиска фермерских прудов // J. Soil Water Conserv. 1996. Том. 51, № 5. Стр. 434–438. ISSN: 00224561.
6. Низар Ахамед Т.Р., Гопал Рао К., Муртхы Х.С.Р. Автоматическое извлечение выходов из резервуаров в субсредстве с использованием цифровых моделей подъема // J. Agric. Water Manag. Elsevier, 2002. Том. 57, № 1. Стр. 1–10. DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00047-1.
7. Бабан С.М.Х., Гуан-Юсоф К. Моделирование оптимальных участков для обнаружения водохранилищ в тропических условиях // J. Water Resour. Manag. 2003. Том. 17, № 1. Стр. 1–17. DOI: 10.1023/A:1023066705226.
8. Форзиери Г. et al. Методология предварительного отбора участков, подходящих для небольших поверхностных и подземных плотин в засушливых районах: тематическое исследование в регионе Кидал, Мали // J. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. Pergamon, 2008. Том. 33, № 1–2. Стр. 74–85. DOI: 10.1016/J.PCE.2007.04.014.
9. Шанг Н. Бин, Парватынатан Г., Бреден Х.Б. Сочетание ГИС с диффузным многокритериальным принятием решений для размещения свалок в быстрорастущем городском регионе // J. Environ. Manage. Academic Press, 2008. Том. 87, № 1. Стр. 139–153. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.01.011.
10. Каллалы Х. и др. Анализ множественных критериев на основе ГИС для потенциальных мест пополнения водоносных горизонтов сточных вод // J.

- Desalination. Elsevier, 2007. Том. 215, № 1–3. Стр. 111–119. DOI: 10.1016/j.desal.2006.11.016.
11. Гемитзи А. и др. Использование ГИС в установках стабилизационного пруда для очистки бытовых сточных вод // J. Environ. Manage. 2007. Том. 82, № 2. Стр. 155–166. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.12.022.
 12. Ал-Адамат Р. и др. Сочетание знаний коренных народов и гео-вычислений для места сбора воды в Иорданской Бадии // J. Geogr. Inf. Syst. Scientific Research Publishing, 2012. Том. 04, № 04. Стр. 366–376. DOI: 10.4236/jgis.2012.44042.
 13. Ал-Адамат Р. Использование ГИС и Google Earth для предварительного выбора места пополнения подземных вод в районе оазиса Азрак-Иордания // J. Water Resour. Prot. Scientific Research Publishing, 2012. Том. 04, № 06. Стр. 395–399. DOI: 10.4236/jwarp.2012.46045.
 14. Гомес Делгадо М. Географические информационные системы и многокритериальная оценка землепользования // 17 junio. 2^a ed. Ra-Ma, 2005. 304 стр. ISBN: 9788478976737.
 15. Ханкочски П. Интеграция географических информационных систем и множественные критерии принятия решений // Int. J. Geogr. Inf. Syst. 1995. Том. 9, № 3. Стр. 251–273. DOI: 10.1080/02693799508902036
 16. Леаке К., Малсзечски Х. ГИС и анализ решений с несколькими критериями // J. Oper. Res. Soc. J. Wiley & Sons, 2000. Том. 51, № 2. Стр. 247. DOI: 10.2307/254268.
 17. Переира Х.М.К., Дускстеин Л. Подход к принятию решений с несколькими критериями для оценки пригодности земли на основе ГИС // Int. J. Geogr. Inf. Syst. 1993. Том. 7, № 5. Стр. 407–424. DOI: 10.1080/02693799308901971.
 18. Винске П. Анализ многокритериальной помощи в принятии решений в Европе // Eur. J. Oper. Res. North-Holland, 1986. Том. 25, № 2. Стр. 160–168. DOI: 10.1016/0377-2217(86)90082-2.
 19. Маринони О. Стохастическая система поддержки принятия пространственных решений на основе PROMETHEE // Int. J. Geogr. Inf. Sci. 2005. Том. 19, № 1. Стр. 51–68. DOI: 10.1080/13658810412331280176.
 20. Ромеро К. Анализ многокритериальных решений. Мадрид: Isdefe, 1996. 115 p. ISBN: 84-89338-4-0.
 21. Кылили А. и др. Многокритериальный анализ для выбора наиболее подходящих энергетических культур: случай Кипра // Int. J. Sustain. Energy. 2016. Том. 35, № 1. Стр. 47–58. DOI: 10.1080/14786451.2014.898640.
 22. Греене Р. и др. Анализ решений с несколькими критериями на основе ГИС // J. Geogr. Compass. 2011. Том. 5, № 6. Стр. 412–432. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x.
 23. Ламелас М.Т. Методологическая схема принятия решений по устойчивому землепользованию: применение к локализации промышленных почв // J. GeoFocus. Rev. Int. Cienc. y Tecnol. la Inf. Geográfica. 2009. Том. 9, № 1578–5157. Стр. 28–66. ISSN: 1578-5157.
 24. Перпинна Кастилло К. Методологии определения местоположения установок биомассы с помощью моделей определения местоположения на основе линейного программирования и многокритериальной оценки в среде

- географических информационных систем // Riunet. Валенсия (Испания): Политехнический Университет Валенсии, 2012. DOI: 10.4995/Thesis/10251/14721.
25. Саати Р.Ч. Процесс аналитической иерархии: что это такое и как оно используется // J. Math. Model. Pergamon, 1987. Том. 9, № 3–5. Стр. 161–176. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
26. Дьер Р.Ф., Форман Э.Г. Поддержка групповых решений с помощью процесса аналитической иерархии // J. Decis. Support Syst. North-Holland, 1992. Том. 8, № 2. Стр. 99–124. DOI: 10.1016/0167-9236(92)90003-8.
27. Саати Т.Л., Кearnс К.П.Б. Рекомендуемая шкала относительной важности // Аналитическое планирование. Организация систем. Радио и Связь, 1991. Р. 1991 г., 224 стр. ISBN: 5-256-00380-1.
28. Руштон Г. Системы поддержки пространственных решений // International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. I TC, 2001. Стр. 14785–14788. DOI: 10.1016/b0-08-043076-7/02522-5.
29. Себаллос Б. и др. Метод TOPSIS относительный против. Абсолютный // Прямая. Испанская Ассоциация преподавателей математики для экономики и бизнеса (ASEPUMA), 2013. Том. 14, № 2. Стр. 181–192. ISSN: 1575605X.
30. Хапуараши Х.А.П., Гуанг В.Х., Пагано Т.С. Обзор достижений в прогнозировании внезапных наводнений // J. Hydrol. Process. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. Том. 25, № 18. Стр. 2771–2784. DOI: 10.1002/hyp.8040.
31. Петерам К., Галлант Х., Read A. Автоматизированный и быстрый метод определения местоположения стенок плотин и оценки продуктивности водохранилищ на больших площадях // J. Environ. Model. Softw. Elsevier Ltd, 2017. Том. 92. Стр. 189–201. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.02.016.
32. Исиоие, О.А., Шебе, М.Г., Момог, У.О., и Бако С.Н. Многокритериальная система поддержки принятия решений (MCDA) для определения места сбора дождевой воды в Зарии, штат Кадуна, Нигерия // IJASETR. 2012. Том. 1, № 1. Стр. 53–71. ISSN: 1839-7239.
33. Елхаг А.Р., Елхаск И.Х. DAM выбор сайтов с использованием методов ГИС и дистанционного зондирования для минимизации внезапных наводнений в местности Восточного Нила (Долина Соба) – штат Харгум // Int. J. Eng. Sci. Invent. 2016. Том. 5, № 12. Стр. 50–61. ISSN: 2319-6734.
34. Lu B. et al. Алгоритмы геоинформационной системы для определения местоположения перспективных площадок для хранения гидроэнергии на перекачке // J. Appl. Energy. Elsevier, 2018. Том. 222, № Январь. Стр. 300–312. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.177.
35. Пинсотт-Миллер Д. и др. Обзор и разработка рамок для решения проблемы потенциала внезапных наводнений с использованием пространственно-гидрологического моделирования с помощью ГИС // Pap. Present. Queensl. Surv. Spat. Conf. 2012. 2012. Стр. 1–16.

Rodriguez Vazquez Solangel

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: solrusita85@gmail.com

Mokrova Nataliya Vladislavovna

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: mokrovanv@mgsu.ru

Multi-criteria assessment of territorial planning alternatives using geographic information system technologies for dam construction

Abstract. Territorial planning when selecting catchment areas is necessary for increase the availability of water resources. However, changes in land use sometimes occur without taking into account the characteristics of the territory, which can lead to an impact on the environment. Given the multipurpose use, large-scale projects with of private interests, the task becomes more urgent, and there is no related data, there is a mutual influence of infrastructure which necessary for the proper planning and design of hydraulic structures. Identifying suitable areas for certain methods of collecting and retaining water using advanced methods in Geomatics remains one of the important goals of this investigation and the author's dissertation research. This study focuses on the analysis of models and multi-criteria analysis methods used in making decisions about the localization of areas for dam construction that are based with geographic information systems. The author analyzes the paradigms of rationality proposed for making complex decisions, and sets the framework according to which theoretical developments of multi-criteria analysis can provide greater practical significance. The author critically analyzes various approaches and theoretical studies of the subject under consideration. Based on the study, it was concluded that the combination of "multi-criteria analysis method – geoinformation system" has the potential to provide a rational, objective and unbiased approach to decision-making when identifying potential areas when planning the construction of hydraulic structures, as well as the need for an integration component that will speed up decision-making when localizing potential areas, taking into account the main factors, including environmental and social ones.

Keywords: multi-criteria analysis; dam construction; geomatics; catchment area localization, geo-information systems

REFERENCES

1. Païen Kh., Faures Kh.-M., Vallee D. (2012). Small reservoirs and water storage for smallholder farming. Case of a new approach. *Report*, (3), pp. 1–60 (in Russian) DOI: 10.21955/GATESOPENRES.1115486.1.
2. Akhmad I., Berma M.K. (2018). Application of the analytical hierarchy process in water resource planning: a GIS-based approach to identifying suitable sites for water storage. *J. Water Resour. Manag.*, 15(32), pp. 5093–5114 (in Russian) DOI: 10.1007/s11269-018-2135-x.
3. Singkh K.H.P., Singkh D., Litoriya P.K. (2009). Selection of suitable sites for water collection structures in the Soankhad basin, Punjab, using the remote sensing and geographical information (DZ & GIS) approach, case study. *J. Indian Soc. Remote Sens. Springer-Verlag*, 1(37), pp. 21–35 (in Russian) DOI: 10.1007/s12524-009-0009-7.
4. Srivastava R.K. (1996). Integrated Tank Irrigation System Design Optimization Methodology. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 6(122), pp. 394–402 (in Russian) DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:6(394).
5. Vorkhauer K.F., Khamlett J.M. (1996). GIS: Farm Pond Finder Tool. *J. Soil Water Conserv.*, 5(51), pp. 434–438 (in Russian) ISSN: 00224561.
6. Nizar Akhamed T.R., Gopal Rao K., Murthy K.H.S.R. (2002). Automatically extract tank exits in a facility using digital lift models. *J. Agric. Water Manag. Elsevier*, 1(57), pp. 1–10 (in Russian) DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00047-1.
7. Baban S.M.K.H., Guan-Yusof K. (2003). Modeling optimal sites for reservoir detection in tropical conditions. *J. Water Resour. Manag.*, 1(17), pp. 1–17 (in Russian) DOI: 10.1023/A:1023066705226.
8. Forzieri G. and etc. (2008). Pre-selection methodology for sites suitable for small surface and underground dams in arid areas: case study in Kidal, Mali. *J. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. Pergamon*, 1–2(33), pp. 74–85 (in Russian) DOI: 10.1016/J.PCE.2007.04.014.
9. Shang N. Bin, Parvatynatan G., Breeden Kh.B. (2008). Combining GIS with Diffuse Multi-Criteria Decision Making for Landfill Locations in a Fast-Growing Urban Region. *J. Environ. Manage. Academic Press*, 1(87), pp. 139–153 (in Russian) DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.01.011.
10. Kallaly Kh. and etc. (2007). GIS-based multiple criteria analysis for potential aquifer recharge sites. *J. Desalination. Elsevier*, 1–3(215), pp. 111–119 (in Russian) DOI: 10.1016/j.desal.2006.11.016.
11. Gemitzi A. and etc. (2007). The use of GIS in stabilization pond installations for domestic wastewater treatment. *J. Environ. Manage.*, 2(82), pp. 155–166 (in Russian) DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.12.022.
12. Al-Adamat R. and etc. (2012). Combination of indigenous knowledge and geo-computing for a water collection site in the Jordanian Badia. *J. Geogr. Inf. Syst. Scientific Research Publishing*, 4(4), pp. 366–376 (in Russian) DOI: 10.4236/jgis.2012.44042.
13. Al-Adamat R. (2012). Use of GIS and Google Earth for preliminary selection of a groundwater recharge site in the region of the oasis of Azrak-Jordan. *J. Water Resour.*

- Prot. Scientific Research Publishing*, 6(4), pp. 395–399 (in Russian) DOI: 10.4236/jwarp.2012.46045.
14. Gomes Delgado M. (2005). Geograficheskie informatsionnye sistemy i mnogokriterial'naya otsenka zemlepol'zovaniya. [*Geographic information systems and multicriteria land use assessment.*] p. 304. ISBN: 9788478976737.
 15. Khankochski P. (1995). Integration of Geographic Information Systems and Multiple Decision Criteria. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 3(9), pp. 251–273 (in Russian) DOI: 10.1080/02693799508902036.
 16. Leake K., Malszechski Kh. (2000). GIS and decision analysis with multiple criteria. *J. Oper. Res. Soc. J. Wiley & Sons*, 2(51), pp. 247 (in Russian) DOI: 10.2307/254268.
 17. Pereira Kh.M.K., Duskstein L. (1993). GIS-Based Decision Making Approach with Multiple Criteria. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 5(7), pp. 407–424 (in Russian) DOI: 10.1080/02693799308901971.
 18. Vinske P. (1986). Analysis of multicriteria decision-making assistance in Europe. *Eur. J. Oper. Res. North-Holland*, 2(25), pp. 160–168 (in Russian) DOI: 10.1016/0377-2217(86)90082-2.
 19. Marinoni O. (2005). Stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 1(19), pp. 51–68 (in Russian) DOI: 10.1080/13658810412331280176.
 20. Romero K. (1996). *Analysis of multicriteria decisions*. Madrid: Isdefe, p. 115. ISBN: 84-89338-4-0.
 21. Kylili A. and etc. (2016). Multi-criteria analysis to select the most suitable energy crops: the case of Cyprus. *Int. J. Sustain. Energy.*, 1(35), pp. 47–58 (in Russian) DOI: 10.1080/14786451.2014.898640.
 22. Greene R. and etc. (2011). GIS-based decision analysis with multiple criteria. *J. Geogr. Compass.*, 6(5), pp. 412–432 (in Russian) DOI: 10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x.
 23. Lamelas M.T. (2009). Sustainable land management decision-making methodology: application to localization of industrial soils. *J. GeoFocus. Rev. Int. Cienc. y Tecnol. la Inf. Geográfica*, 1578–5157(9), pp. 28–66. ISSN: 1578-5157.
 24. Perpinna Castillo K. (2012). Metodologii opredeleniya mestopolozheniya ustanovok biomassy s pomoshch'yu modeley opredeleniya mestopolozheniya na osnove lineynogo programmirovaniya i mnogokriterial'noy otsenki v srede geograficheskikh informatsionnykh sistem. [*Methodologies for determining the location of biomass plants using positioning models based on linear programming and multi-criteria assessment in the environment of geographical information systems.*] Valencia (Spain): Polytechnic University of Valencia. DOI: 10.4995/Thesis/10251/14721.
 25. Saati R.Ch. (1987). The process of analytic hierarchy: what is it and how is it used. *J. Math. Model. Pergamon*, 3–5(9), pp. 161–176 (in Russian) DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
 26. Dyer R.F., Forman Eh.G. (1992). Support for group decisions through the analytic hierarchy process. *J. Decis. Support Syst. North-Holland*, 2(8), pp. 99–124 (in Russian) DOI: 10.1016/0167-9236(92)90003-8.
 27. Saati T.L., Kearns K.P.B. (1991). Rekomenduemaya shkala otnositel'noy vazhnosti. [*Recommended Relative Importance Scale.*] p. 224. ISBN: 5-256-00380-1.

28. Rushton G. (2001). Spatial Support Systems. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, pp. 14785–14788 (in Russian) DOI: 10.1016/b0-08-043076-7/02522-5.
29. Seballos B. and etc. (2013). TOPSIS Method Relative vs.. Absolute. *Direct. Spanish Association of Teachers of Mathematics for Economics and Business (ASEPUMA)*, 2(14), pp. 181–192 (in Russian) ISSN: 1575605X.
30. Khapuarashchi Kh.A.P., Guang V.Kh., Pagano T.S. (2011). Overview of Flash Flood Forecasting Achievements. *J. Hydrol. Process. John Wiley & Sons, Ltd*, 18(25), pp. 2771–2784. (in Russian) DOI: 10.1002/hyp.8040.
31. Peteram K., Gallant Kh., Read A. (2017). Automated and fast method for determining the location of dam walls and assessing reservoir productivity over large areas. *J. Environ. Model. Softw. Elsevier Ltd*, (92), pp. 189–201 (in Russian) DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.02.016.
32. Isioie O.A., Shebe M.G., Momog U.O., Bako S.N. (2012). Multicriteria Decision Support System (MCDA) for locating rainwater in Zaria, Kaduna, Nigeria. *IJASETR*, 1(1), pp. 53–71 (in Russian) ISSN: 1839-7239.
33. Elkhag A.R., Elkhask I.Kh. (2016). DAM site selection using GIS and remote sensing methods to minimize flash floods in the East Nile (Soba Valley) – Khartoum State. *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, 12(5), pp. 50–61 (in Russian) ISSN: 2319-6734.
34. Lu B. and etc. (2018). Geographic information system algorithms for determining the location of promising sites for storage of hydropower at the pumping. *J. Appl. Energy. Elsevier*, (222), pp. 300–312 (in Russian) DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.177.
35. Pinsott-Miller D. and etc. (2012). Review and development of a framework for solving the problem of flash flood potential using spatial-hydrological modeling using GIS. *Pap. Present. Queensl. Surv. Spat. Conf.*, pp. 1–16 (in Russian).