Факторы оценки альтернатив при проектировании и обосновании целесообразности строительства гидротехнических сооружений

Родригес Васкес Соланхель, Н.В. Мокрова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Водохранилища являются важным элементом для регулирования водных ресурсов и вносят большой вклад в экономику регионов. Предлагается многокритериальный подход к выбору перспективных районов для расположения плотин в условиях отсутствия полной информации о количественной оценке отдельных критериев. Морфометрическая характеристика водосборных бассейнов — один из ключевых инструментов анализа водных ресурсов и представляет собой количественное исследование, предназначенное для математического моделирования наиболее значительных характеристик бассейна и их увязки с индексами и параметрами, позволяющими узнать гидрологическую ситуацию. Задача исследования — выбор и ранжирование факторов для установления приоритетных областей для строительства гидротехнических сооружений.

Материалы и методы. Проведен критический анализ библиографии и обоснованно выбраны гидрологические, геологические, топографические аспекты и факторы землепользования, что дает возможность предложить иерархическую модель принятия решений по приоритизации районов для проектирования гидросооружений.

Результаты. С использованием гибридного метода многокритериального анализа АНР-TOPSIS выбраны параметры, впоследствии факторы, необходимые при принятии решений для определения перспективного региона строительства, что даст возможность сократить объемы предпроектных работ в конкретном регионе. Водосбор, в котором изучаются предлагаемые параметры и коэффициенты, будет хорошо охарактеризован с учетом его гидрологии, топографии, геологии и использования местности. В качестве примера применения подхода рассматривается муниципалитет Маникарагуа, принадлежащий провинции Вилья-Клара (Куба). На основе информации геоинформационных систем и применения гибридного метода многокритериального анализа выполнено парное сравнение альтернатив по каждому из установленных параметров, получены веса альтернатив и приведен порядок приоритизации областей расположения гидротехнических сооружений.

Выводы. Анализ приоритетности районов с использованием выбранных параметров в качестве критериев и альтернатив позволил проанализировать 12 591 района муниципалитета Маникарагуа для строительства гидротехнических сооружений и расчетным образом сократить их количество до 23 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морфометрические характеристики, водосборный бассейн, приоритизация районов водопользования, выбор альтернатив, расположение плотины, многокритериальный анализ, гибридный метод АНР-TOPSIS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соланхель Р.В., Мокрова Н.В. Факторы оценки альтернатив при проектировании и обосновании целесообразности строительства гидротехнических сооружений // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.4

Factors used to evaluate alternative options in the course of design and substantiation of feasibility of construction of hydraulic structures

Rodriguez Vazquez Solangel, Nataliya V. Mokrova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Reservoirs are important elements of the water resources regulation system; they make a substantial contribution to regional economies. A multi-criterial approach to selection of the best locations for dams is proposed in the absence of exhaustive information on the quantitative assessment of individual criteria. Morphometric characteristics of retaining reservoirs are among the most important tools for analyzing water resources; they represent a quantitative study designated for the mathematical simulation of the most important characteristics of a reservoir and their linking to the indices and parameters that allow to find out the hydrological conditions. The purpose of the study is to select and rank the factors needed to determine the priority locations for the construction of hydraulic structures.

Materials and methods. A critical analysis of the research works is carried out; the hydrological, geological, topographical aspects and land use factors are reasonably selected, which allow to propose a hierarchical decision-making model for prioritizing areas where hydraulic structures can be designed.

Results. AHP-TOPSIS, a hybrid method of the multicriterial analysis, was used. A reasonable choice of parameters and other factors is necessary to make decisions needed to determine the best area that will accommodate construction works, since it will reduce the amount of pre-project work in a particular region. The reservoir, whose parameters and coefficients are studied, will be thoroughly explored with a focus on its hydrology, topography, geology, and terrain use. The municipality of Manicaragua, belonging to the province of Villa Clara, Cuba, is considered as a case of the practical application of this approach. Based on the information provided by the geographic information systems and the hybrid method of the multicriterial analysis, a pairwise comparison of alternatives for each of the established parameters was performed, the weights of alternatives were obtained, and the order of prioritization of the areas that can accommodate hydraulic structures was established.

Conclusions. The analysis of the priority areas, made on the basis of the selected parameters used as the criteria and alternatives, allowed us (1) to analyze 12,591 districts of the municipality of Manicaragua as the potential locations of hydraulic structures, and (2) to reduce their number to 23 %.

KEYWORDS: morphometric characteristics, reservoir, prioritization of water use areas, choice of alternatives, dam location, multi-criterial analysis, AHP-TOPSIS hybrid method

FOR CITATION: Solangel R.V., Mokrova N.V. Factors used to evaluate alternative options in the course of design and substantiation of feasibility of construction of hydraulic structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(2):4. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.4 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Регионы, имеющие недостаток водных ресурсов, обладают определенными гидрографическими характеристиками. Устойчивость сложившихся экосистем, характеристики конкретных водных объектов следует принимать во внимание при хозяйственной деятельности человека, в том числе при строительстве гидротехнических сооружений для обеспечения населения водой. Изучение геоморфологических особенностей водораздела дает возможность решить проблемы, связанные с отсутствием информации о своеобразии региона. Знание гидрологических, гидравлических и гидродинамических особенностей позволяет говорить о перспективных проектах плотин, что возможно при тщательном наблюдении за гидрологическими изменениями, процессами стока и эрозии, которые окажут воздействие на окружающую среду в районе исследования.

Физические показатели (геология, климат, топография, почва, растительный покров) дренажной сети водораздела представляют собой условие возникновения потока воды в естественных дренажах, динамически реагируя на них, определяя тем самым их режим. Морфометрический анализ позволяет интерпретировать и прогнозировать гидрологические особенности водораздела; этот анализ выполняется путем получения морфометрических индексов, начиная с формы бассейна, дренажной сети и рельефа.

Морфометрические характеристики дают возможность численно оценить и охарактеризовать водосборные бассейны и впоследствии применять математические методы для обоснования выбора регионов с благоприятными условиями для строительства водосборных гидросооружений. Сложная многопараметрическая функция, определяющая гидрологический режим водосбора или бассейна, в первую очередь зависит от климата и геоформы местности. Формы поверхности земли, высотное положение оказывают решающее влияние на гидрологический режим, определяются также осадками, стоком, инфильтрацией, образованием отложений и пр. Морфометрия имеет решающее значение для

документирования территориальной аналогии и установления гидрологических отношений обобщения, выражая в простых значениях описания сложных ландшафтов.

Цель исследования — обосновать выбор ряда морфометрических и гидрологических параметров, которые послужат основой для многокритериального анализа в задаче выбора альтернатив при оценке местности для расположения гидротехнических сооружений.

Для строительства плотины необходимо провести тщательную разведку района исследования, чтобы уточнить особенности местности, на которой предполагается размещение сооружения. Этот первый шаг позволяет выявить проблемы рассматриваемого бассейна, наличие и потенциальные ресурсы района, характеризуя различные производственные виды деятельности и отражая, среди прочего, перспективы будущего развития. Такая диагностика должна собирать как можно больше доступной информации о водных, почвенных и климатических ресурсах, а также сведения, связанные с производством, промышленностью, экологией, землепользованием и др. Следующим шагом является применение математического аппарата, алгоритмических методов, методов теории принятия решений для выбора приоритетного района строительства плотины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Критический анализ библиографических источников дал возможность предложить следующие морфометрические и гидрологические параметры, которые послужат основой алгоритмов принятия решений о целесообразности строительства гидросооружений.

Е. Abushand и соавт. [1], Р. Rezaei и соавт. [2], J. Chezgi и соавт. [3], В.Н. Шевченко и др. [4], Е.Д. Вишнякова [5], А.О. Пагин и др. [6], Р.Т. Шереметов и др. [7], Ю.А. Падалко [8] альтернативно используют параметры в связи с типом исследований, которые они проводят для анализа определенного бассейна. В то же время все исследования совпадают

по ряду параметров, которые являются постоянными при данном анализе:

1. Гидрологические аспекты района исследования

1. Длина основного водотока L_m — мера основного стока водосбора от самой высокой части до устья; как правило, этот параметр влияет на большинство морфометрических показателей. Большая длина означает большее время перемещения паводков и, как следствие, большее их затухание, поэтому время подъема и общая продолжительность паводков, очевидно, будут больше. Параметр учитывает неровности и изгибы русла¹.

2. Уклон основного водотока P_{cp} — отношение общей высоты основного русла к его длине. Параметр важен, так как он дает индекс средней скорости стока, силы сопротивления и эрозии в области водосбора. Большой наклон и высокая скорость воды связаны с гидравлическим режимом² [9].

3. Время концентрации стока T_c — условно время в пути капли дождевой воды, стекающей поверхностно из самого дальнего места водосбора. Определяется как минимальное время, необходимое для того, чтобы все точки водосбора одновременно подавали сточную воду в точку выхода, точку слива или точку закрытия. С целью расчета параметра могут использоваться различные формулы в зависимости от других параметров водосбора. Для оценки времени концентрации рекомендуется применять несколько эмпирических уравнений, доступных в научной литературе [10–12].

$$\text{California U.S.B.R.: } T_c = 0,066 \left[\frac{L_m}{\sqrt{P_{cp}}} \right]^{0,77}; \quad (1)$$

$$\text{Clark: } T_c = 0,335 \left[\frac{A}{P_{cp}^{0,5}} \right]^{0,593}; \quad (2)$$

$$\text{Passini: } T_c = \left[\frac{0,108 (AL_m)^{0,33}}{P_{cp}^{0,5}} \right]; \quad (3)$$

$$\text{Pilgrim: } T_c = 0,76A^{0,38}, \quad (4)$$

где T_c — время концентрации, ч; L_m — длина самого длинного водотока, км; P_{cp} — средний наклон основного русла, м/м; A — площадь водосбора, км².

¹ Чеботарев А.И. Реки. Формирование гидрографической сети и речных систем. Основные элементы речных систем. URL: <http://abratsev.ru/hydrosphere/rivers1.html>

² Параневич В.Т. Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017.

4. Оценка максимального расхода на водосборе Q_p . Для определения максимальных стоков в водосборе существует множество методологий, некоторые из которых используют исторические гидрометрические записи, а другие, более часто применяемые, основаны на информации об осадках для получения максимальных стоков; чаще это называют дождевым стоком. Один из методов оценки — рациональный метод [13].

Рациональный метод обычно применяется к небольшим водосборам, и полученные результаты приемлемы для подобных случаев. Тем не менее метод также используется в водосборах среднего размера, если выбраны необходимые минимальные гипотезы. Для оценки максимальных потоков с помощью рационального метода считается, что осадки выпадают с равномерной интенсивностью по всему водосбору, и значение коэффициента стока представляет всю площадь водосбора. После оценки всех параметров, требуемых для расчета максимальных расходов, приступают к их оценке по уравнению [13]:

$$Q_p = 0,278CIA, \quad (5)$$

где Q_p — максимальный расход, м³/с, для данного периода возврата T_c ; C — коэффициент стока; I — интенсивность, мм/ч; A — площадь, км².

5. Коэффициент стока C — отношение поверхностно циркулирующей части осадков к их общему количеству при условии, что поверхностная часть меньше общего количества осадков при испарении, эвапотранспирации и т.д. Коэффициент стока зависит от многих факторов: типа осадков, их количества, интенсивности и распределения во времени; начальной влажности почвы, типа грунта (гранулометрический состав, текстура, структура органического вещества, степени уплотнения, уклон, рельеф, шероховатость), типа растительного покрова и т.д. Коэффициент стока может принимать значения от нуля до единицы [14].

6. Интенсивность дождя I — количество воды, мм, которое падает за единицу времени³:

$$I = \frac{615T_r^{0,18}}{(D+5)^{0,685}}, \quad (6)$$

где I — интенсивность осадков; T_r — срок возврата, для которого проводится анализ; D — средняя продолжительность осадков.

7. Период возврата (лет) T_r .

В прикладной гидрологии взаимозаменяемо используется понятие вероятности $p(x)$ или периода возврата T_r , понимаемого как процент времени возникновения экстремального события; поэтому, если чрезвычайное событие происходит (в среднем) каж-

³ Singh V.P., Chow V.Te. Handbook of applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 2017.

дые T_r лет, его вероятность составляет $\frac{1}{T_r}$. Эти понятия связаны с выражением⁴:

$$p(x) = \frac{1}{T_r}. \quad (7)$$

В гидрологии больше используется период возврата, чем вероятность.

8. Средняя продолжительность осадков, мин, D .

Параметр является коэффициентом, который может быть установлен экспертом в зависимости от цели проекта, соответствует средней продолжительности осадков в исследуемой области [15].

9. Гидрографическая длина водотока L_c — гидрографическая характеристика, которая выражает длину основного течения водотока от источника до устья⁵.

10. Годовой потенциальный коэффициент эвапотранспирации E_p .

Для расчета этой переменной существует несколько эмпирических методов, большинство из которых основано на формулах, полученных в климатических условиях, отличных от тропических. Одним из методов, используемых в тропическом климате, является метод Senicafé – Budyko [16]. Он позволяет вычислить коэффициент потенциальной эвапотранспирации на основе высоты над уровнем моря. Уравнение (8) получается путем регрессии к значениям, полученным при применении метода Пенмана к данным климатических станций [17]:

$$E_p = 1700,17^{-0,0002h}, \quad (8)$$

где E_p — годовая потенциальная эвапотранспирация, мм/лет; h — высота над уровнем моря, м.

11. Реальная эвапотранспирация E_R .

Потенциальная эвапотранспирация преобразуется в реальную эвапотранспирацию путем выражения Будыко, которое представлено в уравнении (9) [18]:

$$E_R = \bar{P} \left[\left(1 - \cos h \frac{E_p}{\bar{P}} + \sin h \frac{E_p}{\bar{P}} \right) \frac{E_p}{\bar{P}} \tan h \frac{\bar{P}}{E_p} \right]^{0,5}, \quad (9)$$

где E_R — реальная эвапотранспирация; E_p — потенциальная эвапотранспирация; $\bar{P}$ — среднегодовое количество осадков водосбора, мм/лет.

Очевидно, что $E_R \leq E_p$. В пустынном месте E_p может быть 6 мм/день, а $E_R = 0$, поскольку нет воды

для эвапотранспирации. Значения одинаковы до тех пор, пока влажность почвы оптимальна и растения развиваются благоприятно. Это происходит на хорошо орошаемом сельскохозяйственном поле или в районе с естественной растительностью в период достаточного количества осадков.

12. Среднегодовое количество осадков на водосборе $\bar{P}$ [19].

13. Коэффициент извилистости участка реки S_i — отношение между длиной реки вдоль ее русла и длиной долины, измеренной по изогнутой или прямой линии. Коэффициент извилистости дает изменение скорости стока воды вдоль потока⁶:

$$S_i = \frac{L_m}{L_v}, \quad (10)$$

где S_i — извилистость; L_m — длина главной реки; L_v — длина долины. Если $S_i \leq 1,25$, это указывает на низкую извилистость; $S_i > 1,25$ — более высокая извилистость, чем выше коэффициент извилистости, тем ниже скорость течения.

14. Среднегодовой объем осадков на водосборе V равен⁷:

$$V = 1000 \bar{P} A, \quad (11)$$

где V — средний объем осадков водосбора, м³/с; $\bar{P}$ — среднегодовое количество осадков водосбора, мм; A — площадь водосбора, км².

15. Коэффициент стабильности реки C_E .

Параметр, предложенный Schumm S.A.⁸ и Чаловым Р.С. [20], представляет собой поверхность, необходимую для поддержания стабильных гидрологических условий:

$$C_E = \frac{A}{\sum L_c}, \quad (12)$$

где C_E — коэффициент стабильности реки; A — площадь водосбора; $\sum L_c$ — сумма длин русел, которые интегрированы в водосборе.

16. Порядок рек O_R .

Порядок определяет степень разветвлений в водосборе. Для этой классификации можно использовать метод Гравеллиуса⁹, который считает, что самая

⁴ Срок возврата — Return period. 2020. URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Return_period

⁵ Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом: утв. Госкомгидрометом // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. 1986. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200077599>

⁶ Определение морфометрических характеристик водоемов. 2020. С. 7. URL: <https://poznayka.org/s30887t1.html>

⁷ Fattorelli S., Fernandez P.C. Hydrological Design. Second / ed. Zaragoza. Spain: Water Assessment & Advisory Global Network, 2011.

⁸ Schumm S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey // GSA Bull. GeoScienceWorld, 1956. Vol. 67. Issue 5. Pp. 597–646. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2

⁹ Руководство по гидрологической практике. Том I. Гидрология: от измерений до гидрологической информации. Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, 2008.

большая река должна быть первого порядка, ее притоки — второго порядка и т.д. Порядок отражает высокую степень бифуркации, что соответствует почвам с высокими склонами, подверженным эрозии. Другая методология для определения порядка предложена Horton-Strahler [21] и широко известна в гидрологии. Поток первого порядка — это потоки основные, когда два потока первого порядка объединяются, создают поток второго порядка, а когда два потока второго порядка объединяются, создают поток третьего порядка и т.д. Следует иметь в виду, что, когда объединяются два потока разного порядка, преобладает больший порядок [22].

Параметр имеет тесную связь с количеством разветвлений дренажной сети, чем больше порядок, тем больше эрозионный потенциал переноса отложений и, следовательно, тем больше компонент прямого стока, чем в другом водосборе аналогичной площади.

17. Коэффициент пролива C_t — отношение количества водных путей первого порядка к площади водосбора. Чем больше номер русла первого порядка и меньше площадь, тем выше коэффициент водосбора¹⁰. Вода быстро попадает в русла, и скорость сброса выше. Запишем отношение¹¹:

$$C_t = \frac{\sum O_{R1}}{A}, \quad (13)$$

где C_t — коэффициент пролива; O_{R1} — количество потоков первого порядка; A — площадь водосбора.

18. Средний сток E_m .

Параметр, который вычисляется для длинного периода времени с использованием данных гидрометрических наблюдений или, в случае отсутствия информации, вычисляется с помощью уравнения водного баланса, адаптированного для каждого региона, а также формул и уравнений, полученных на основе гидрологических данных.

19. Коэффициент стока E_s — сток, создаваемый осадками, может быть получен с использованием рационального метода¹².

$$E_s = \frac{CIA}{360}, \quad (14)$$

где E_s — значение стока; C — коэффициент стока; I — интенсивность осадков; A — площадь водосбора.

¹⁰ Díaz M.A.R., Bermúdez F.L. Morphometry of river networks: critical review of the most used parameters and application to the alto guadalquivir // Papeles Geogr. 1987. No. 12. Pp. 47–62.

¹¹ Córdova M. Geomorphological parameters of river basins. 2018. URL: <https://www.prontubeam.com/articles/2018-09-11-Geomorphological-parameters-of-river-basins/>

¹² Thomason P.E.C. Hydraulic design manual // Onlinemanuals. 2019. URL: http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hydrational_method.htm

II. Топографические аспекты района исследования

1. Площадь водосбора A .

Соответствует поверхности, ограниченной водоразделом исследуемой зоны, км². Это значение очень важно, потому что ошибка в его измерении напрямую влияет на результаты анализа водосбора. Оно является одним из критериев величины стока; при нормальных условиях мгновенные средние, минимальные и максимальные стоки растут по мере роста площади водосбора, другая прямая связь заключается в том, что, чем больше площадь водосбора, тем больше его длина [6].

2. Периметр водосбора P .

Параметр рассматривают как разделительную линию исследуемого водосбора; выражают в метрах или километрах. Параметр сам по себе не дает никакой информации о размере или форме водосбора, однако при сравнении водосборов равной площади значение периметра может дать представление о его форме. Кроме того, P используется для вычисления других параметров, таких как коэффициент компактности [23].

Если определена область водосбора, то его периметр можно сравнить, например, с длиной окружности, получив индексы, которые затем будут проанализированы и укажут нам большую или меньшую часть этого периметра. Периметр и его форма тесно связаны с литологией и возрастом дренажного водосбора. Мягкие породы будут давать округлые формы, в то время как более твердые материалы — более ломанные или лопастные формы. Тенденция водосборов заключается в получении округлых форм при равенстве литологии, округлый водосбор имеет потенциал развития [23].

3. Коэффициент компактности водосбора K_c — отношение периметра водосбора в км к периметру круга площади, равной площади дренажа водосбора. Коэффициент компактности количественно представляет геометрию водосбора и для удлинённых или нерегулярных водосборов немного выше единицы [24]:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}, \quad (15)$$

где P — периметр; A — площадь водосбора. $K_c > 1$ указывает на вероятность возникновения пиков скорости потока. Чем ближе его значение к 1, тем компактнее будет водосбор. Водосбор с K_c ближе к 1 имеет потенциальную опасность роста и развития наводнений.

4. Коэффициент формы водосбора K_f количественно представляет геометрию водосбора, это — отношение площади водосбора к длине основного потока в квадрате¹³.

¹³ Свєргузова С.В., Сапронова Ж.А. Введение в гидрологию. URL: <https://studfile.net/preview/1971369/>

$$K_f = \frac{A}{L_m^2}, \quad (16)$$

где A — площадь водосбора; L_m — длина основного потока. $K_f < 1$ характеризует удлиненную форму водосборов, водосбор с низким коэффициентом формы менее подвержен росту или экстремальным явлениям.

5. Средний уклон водосбора P_m — индекс представляет средний наклон траекторий течения реки, м/м. Средний уклон в значительной степени контролирует скорость поверхностного стока и влияет на время сбора воды в руслах, которые являются частью дренажной сети водосбора⁹.

6. Густота речной сети водосбора D_d .

Важный показатель формы местности и степени эрозии водосбора в зависимости от геологических факторов, факторов растительности и типа почвы. Хорошая базовая топографическая карта водосбора должна правильно отражать плотность дренажа. Количественно это — отношение длины водных путей водосбора к его общей площади¹⁴ [25]:

$$D_d = \frac{\sum L_c}{A}, \quad (17)$$

где L_c — длина водных потоков, км; A — общая площадь поверхности водосбора, км². D_d обычно составляет значения между 0,5 км/км² для водосборов с бедным дренажом и до 3,5 км/км² для исключительно хорошо дренированных водосборов.

Показатель особенно значим, поскольку он отражает влияние геологии, топографии, почв и растительности на водораздел и связан со временем выхода поверхностного стока из водосбора. Высокая плотность дренажа свидетельствует о хорошем дренированном водосборе, который должен относительно быстро реагировать на приток осадков. Водосбор с низкой плотностью дренажа показывает плохо дренированную область с медленным гидрологическим откликом [25].

7. Средняя высота водосбора A_m .

Изменение высоты водосбора непосредственно влияет на климат и, следовательно, на гидрологический режим, а также обеспечивает основу для характеристики различных климатологических и экологических зон в пределах одного и того же водосбора. Удобный и объективный способ описать взаимосвязь между альтиметрическим свойством водосбора в плоскости и его возвышением с использованием гипсометрической функции.

8. Длина водосбора L_v .

Определяется длиной его основного русла, эквивалентным расстоянием, которое проходит река

между точкой стока вниз по течению и точкой, расположенной на наибольшем топографическом расстоянии вверх по течению [26].

9. Средняя ширина водосбора w — отношение площади дренажа водосбора к его длине [27]:

$$w = \frac{A}{L_v}, \quad (18)$$

где A — поверхность водосбора, км²; L_v — длина водосбора, км.

10. Коэффициент развития водораздельной линии I_A .

Связывает длину русла и максимальную ширину водосбора. Определяет, является ли водосбор удлиненным, когда его значение намного больше единицы, или сплюснутым, когда значения меньше единицы [28]:

$$I_A = \frac{L_v}{w}, \quad (19)$$

где I_A — индекс удлинения; L_v — длина водосбора, км; w — ширина водосбора, км.

III. Геологические аспекты района исследования

1. Индекс массивности K_m .

С помощью данного параметра можно показать состояние водосбора относительно того, является ли он горным водосбором или наоборот. Для этого применяют уравнение [29, 30]:

$$K_m = \frac{A_m}{A}, \quad (20)$$

где K_m — коэффициент массивности; A_m — средняя высота водосбора; A — площадь водосбора.

2. Орографический коэффициент C_o .

Параметр выражает потенциал деградации водосбора, учитывает высоту над уровнем моря, которая непосредственно влияет на потенциальный поток воды, и площадь, наклон которой оказывает прямое действие на поверхностный сток. Для его вычисления используют зависимость [31]:

$$C_o = \frac{A_m^2}{A}, \quad (21)$$

где C_o — орографический коэффициент; A_m — средняя высота водосбора; A — площадь водосбора. Если $C_o < 6$, потенциал деградации водосбора низок.

IV. Аспекты, касающиеся использования земель в исследуемом районе

1. Разграничение областей, подходящих для местоположения гидросооружений P_a .

Процесс строительства плотин имеет ряд негативных аспектов на экономическом, социальном и экологическом уровнях, ярким примером этого являются:

¹⁴ Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Изд-во Нестор-История, 2009. 193 с.

- нарушение биологического разнообразия лесов из-за обезлесения районов, в которых проектируется водохранилище;
- вынужденное перемещение населения, проживающего в этих районах;
- возможные наводнения, вызванные климатическими факторами или разрывом плотины;
- воздействие на прилегающие районы: нарушение транспортной инфраструктуры, потери материального имущества как физических лиц, так и государственного имущества, потери сельскохозяйственных угодий и культур и т.д.

Разграничение областей, подходящих для анализа местности, осуществляется с использованием математических методов и вычислительных алгоритмов. Данный подход позволяет специалистам сравнивать возможные варианты, проводить обоснованный выбор и принятие решения о строительстве гидросооружений. Но стоит еще раз отметить, что предлагаемые параметры являются входной информацией для алгоритмов принятия решений, они дают возможность устанавливать ограничения расстояния между исследуемыми районами и охраняемыми районами, принимая во внимание множество альтернативных критериев. Обоснованный выбор исходных параметров, ограничений, формулировка аналитических факторов позволяют в конечном счете избежать неправильных решений, значительных затрат, связанных с неверным выбором региона для строительства гидротехнического сооружения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор приоритетной области или региона для строительства плотины, будь это водосбор, бассейн, единица стока, основан на схеме оптимизации многокритериального принятия решений на базе сложных параметров и их взаимосвязи.

Областью исследования, выбранной для проверки использования параметров при определении

приоритетных районов, стал муниципалитет Маникарагуа, принадлежащий провинции Вилья-Клара (Куба). Муниципалитет Маникарагуа имеет площадь поверхности 1064,4 км², из которых 309 км² его рельефа характеризуется речной равниной и слегка расчлененными высотами предгорий. Район считается подверженным риску наводнений, в частности, долина Джибакоа площадью 12 км², где сильные дожди приводят к изоляции района, что затрагивает 176 домов, и требуется эвакуация 486 человек по причине подъема уровня рек.

При выполнении вычислительного эксперимента за основу исследований взята информация геоинформационных систем. Информация о параметрах была извлечена из слоев (.shp), относящихся к области исследования, с помощью системы QGIS. Использован разработанный гибридный метод многокритериального анализа АНР-TOPSIS (рис. 1), который структурирует проблему принятия решений иерархически (рис. 2) и включает в себя следующие фундаментальные аспекты:

1. Критерии принятия решения — $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, могут быть определены как условия или параметры, которые позволяют различать альтернативы и устанавливать предпочтения лица, принимающего решение; являются эталонами, на основе которых принимается решение.

2. Веса (взвешивание) — показатели относительной важности, важны для лица, принимающего решение (ЛПР). Задаем вектор весов $[w] = [w_1, \dots, w_n]$, n — количество критериев. Вес w_i отражает относительную важность критерия C_i в решении и считается положительным.

3. Альтернативы — различные подходы к решению проблемы. Набор альтернатив обозначается $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, где $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ являются каждой из возможных альтернатив. Каждый набор альтернатив A — это разные, исключающие и исчерпывающие альтернативы.

Рис. 1. Схема АНР-TOPSIS

Рис. 2. Иерархизация параметров при анализе альтернатив для определения приоритетов земли

4. Матрица оценки или решения (табл.). После установления критериев и связанных с ними весов ЛПР может дать для каждого из рассматриваемых критериев и для каждой альтернативы набора числовое или символическое значение a_{ij} , выражающее оценку или суждение альтернативы A_j по отношению к критерию C_j . Эта оценка может быть числовой или вербальной и представлена в виде матрицы, матрицы оценки или матрицы решения. Каждая строка массива выражает качество альтернативы A_j по отношению к n рассматриваемым критериям. В каждом столбце матрицы собраны оценки или суждения, вынесенные наилучшими среди всех альтернатив по критерию C_j .

После построения матриц проводится парное сравнение между каждой альтернативой (областями исследования) по каждому из установленных параметров, а затем в соответствии с весами, полученными для каждой альтернативы, устанавливается порядок приоритизации областей.

Вычисление значения R_i для каждой из альтернатив A_j выполняется с использованием следующего уравнения:

$$R_i = \sum_j w_j r_{ij}, \quad (22)$$

где R_i — производительность, полученная для одной из альтернатив A_j ; w_j — вес, соответствующий каждому критерию C_j ; r_{ij} — вектор приоритетов, полученный путем сравнения A_j по отношению к каждому из C_j .

Схема предложенного алгоритма (рис. 1) включает определение оцениваемых критериев, согласно принятой иерархии (парные сравнения и вычисление весов критериев). Стоит отметить, что время концентрации стоков T_c , порядок реки (O_R), коэффициенты компактности K_c и формы K_f водосбора, а также индекс массивности K_m , согласно экспертной оценке, отнесены к категории наивысшей важности. Получены парные матрицы для оценки весов и построения иерархии критериев. Метод анализа иерархий (АНР) позволяет оценить согласованность матрицы парного сравнения. В работе [32] авторами проанализированы методы вычислительного пространственного анализа и многокритериальной оценки, предложены подходы и вычислительные технологии с использованием MATLAB.

На основе совместного использования преимуществ схемы АНР-TOPSIS (рис. 1) в ходе вычислительного эксперимента получены результаты по выбору приоритетов среди подкритериев, установлены локальные и глобальные приоритеты альтернатив, получена взвешенная нормализованная матрица решений, определены положительное и отрицательное идеальные решения, а также расстояние между ними. Таким образом, реализованный вычислительный алгоритм дает возможность оценить каждое альтернативное решение и осуществить выбор приоритетных районов в соответствии с установленным рейтингом.

После проведения многокритериального анализа приоритетности районов с использованием выбранных параметров в качестве критериев и альтер-

Рис. 3. Выбор площадей, подходящих для строительства гидротехнических сооружений

натив исследуемых районов число подходящих из 12 591 района, проанализированного для возможного строительства гидротехнических сооружений, было сокращено до 23 % (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Задача обеспечения доступности водных ресурсов ставит необходимость строительства водохранилищ. Это сопряжено с экономическими затратами и выгодами, как с негативными, так и положительными воздействиями на окружающую среду. Изучение параметров, факторов и критериев, относящихся к потенциальным областям для строительства, приобретает значение при их оценке для принятия решений. Предпроектные обследования, например, геотехнических характеристик и свойств фундамента, можно проводить только непосредственно на месте. Возможность, предоставляемая настоящим исследованием, заключается в том, что специалисты сокращают зону поиска земель и не тратят время на анализ неперспективных областей. Таким образом, остальные анализы, которые необходимо будет провести непосредственно на земле, будут более конкретными, поскольку область будет считаться подходящей для местоположения с точки зрения гидрологии.

Для принятия решения о критериях и основной цели был проведен отбор группы экспертов, в состав которой вошли четыре ведущих эксперта исследовательского отдела провинциального института гидротехники. Эксперты решили использовать 32 параметра

в качестве подкритериев, распределенных по четырем фундаментальным критериям, как показано на рис. 2. Альтернативами, оцененными и сравненными, были 29 гидрологических бассейнов, соответствующих муниципалитету Маникарагуа, которые проанализированы иерархически методом АНП-TOPSIS. Исследованы районы рек (общее количество 12 591), относящиеся к каждому бассейну, с использованием критерия землепользования, что позволило сократить до 23 % общее количество изученных районов таким образом, чтобы не затрагивать районы, которые определяются как охранные зоны, по экологическим причинам, как промышленные зоны, городская застройка и др. Впоследствии полученные районы рек, как потенциальные зоны для строительства гидротехнических сооружений, организованы иерархически в зависимости от гидрологического бассейна, к которому они принадлежат.

Потеря информации во время работы с этими параметрами минимальна, поскольку они являются переменными, которые извлекаются из цифровой модели, а другие, в свою очередь, были рассчитаны с помощью географической информационной системы QGIS.

Проведенный многокритериальный анализ может применяться для определения приоритетности областей вмешательства на уровне бассейна, водосбора и единиц стока в зависимости от размера и цели проекта. Заметим, что важно прежде всего иметь цифровую модель рельефа в масштабе, которая позволит более точно получить морфометрические параметры как линейной, так и формальной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abushandi E., Alatawi S. Dam site selection using remote sensing techniques and geographical information system to control flood events in Tabuk City // Journal of Waste Water Treatment & Analysis. 2015. Vol. 06. Issue 01. DOI: 10.4172/2157-7587.1000189

2. Rezaei P., Rezaie K., Nazari-Shirkouhi S., Tajabadi M.R.J. Application of fuzzy multi-criteria decision making analysis for evaluating and selecting the best location for construction of underground dam // Acta Polytechnica Hungarica. 2013. Vol. 10. Issue 7. Pp. 187–205. DOI: 10.12700/aph.10.07.2013.7.13

3. *Chezgi J., Pourghasemi H.R., Naghibi S.A., Moradi H.R., Zarkesh M.K.* Assessment of a spatial multi-criteria evaluation to site selection underground dams in the Alborz Province, Iran // *Geocarto International*. 2016. Vol. 31. Issue 6. Pp. 628–646. DOI: 10.1080/10106049.2015.1073366
4. *Шевченко В.Н., Демченко Е.Р.* Морфометрические характеристики реки Тихая Сосна // *Вектор ГеоНаук*. 2018. Т. 1. № 1. С. 59–61.
5. *Вишнякова Е.Д.* Морфометрические характеристики бассейна реки Карачан // *Державинский форум*. 2019. Т. 3. № 10. С. 198–203.
6. *Пагин А.О., Барышников Н.Б., Демидова Ю.В., Селина Т.С.* Морфометрические характеристики бассейна, поймы, русла реки и транспорт наносов русловыми потоками // *Геоморфология*. 2010. Т. 4. С. 80–85. DOI: 10.15356/0435-4281-2010-4-80-85
7. *Шереметов Р.Т., Галахов В.П.* Влияние морфометрических параметров речных бассейнов на таксономическое богатство флоры (на примере бассейна р. Томь) // *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2020. № 2. С. 76–89. DOI: 10.36906/2311-4444/20-2/10
8. *Падалко Ю.А.* Морфометрические особенности речных водосборов степной зоны Оренбуржья // *Вопросы степеведения*. 2013. № 10. С. 62–65.
9. *Shumie M.C.* River slope and roughness impact on downstream hydraulic structures // *Journal of Earth Science & Climatic Change*. 2018. Vol. 9. Issue 11. DOI: 10.4172/2157-7617.1000500
10. *Солодовников А.Б.* Методы определения времени бассейнового добега на малых водосборах // *Проектирование развития региональной сети железных дорог*. 2018. № 6. С. 32–57.
11. *Sandoval-Erazo W., Toulkeridis T., Rodríguez-Espinosa F., Mora M.J.M.* Velocity and time of concentration of a basin — A renewed approach applied in the Rio Grande Basin, Ecuador // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 191. P. 012117. DOI: 10.1088/1755-1315/191/1/012117
12. *Солодовников А.Б.* Время концентрации стока на водосборе и влияющие на него факторы // *Проектирование развития региональной сети железных дорог*. 2017. № 5. С. 78–91.
13. *Солодовников А.Б.* Описание рационального метода расчета дождевого стока // *Проектирование развития региональной сети железных дорог*. 2014. № 2. С. 93–101.
14. *Палагин Е.Д., Быкова П.Г., Шувалов М.В., Тараканов Д.И., Цыпин А.В.* К расчету схем регулирования поверхностного стока // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2015. Т. 12. С. 73–80.
15. *Капустин А.В., Колбин В.А., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Оценка продолжительности осадков по радиолокационным характеристикам конвективной облачности // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2018. № 589. С. 114–124.
16. *Osejo B.B., Vargas T.B., Martinez J.A.* Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from Worldclim and Chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Urabá region of Colombia // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2019. Vol. 14. Issue 02. Pp. 105–117. DOI: 10.2495/SDP-V14-N2-105-117
17. *Понькина Е.В., Россова А.С., Герпсумер К.Ю., Бондарович А.А., Шмидт Г., Иллигер П.* Подходы к оценке потенциальной эвапотранспирации // *Труды семинара по геометрии и математическому моделированию*. 2019. № 5. С. 125–133.
18. *Козырева Л.В., Доброхотов А.В.* Рациональное использование водных ресурсов с автоматизированным расчетом полива посевов на орошаемом поле // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2020. № 1. С. 92–107. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-1-6
19. *Мухин В.М.* Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013. № 349. С. 5–46.
20. *Чалов Р.С.* О различных подходах к оценке устойчивости речных русел // *Геоморфология*. 2015. № 2. С. 18–25. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-18-25
21. *Лобанов Г.В., Сабайда Е.А., Тришкин Б.В., Зверева А.Ю., Полякова А.В., Новикова М.А. и др.* Подходы к оценке потенциала малой гидроэнергетики (на примере бассейна верхнего Днепра) // *Вестник Брянского государственного университета*. 2014. № 4. С. 117–126.
22. *Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Носань В.В., Христофоров А.В.* Подобие рек и их систем // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40. № 6. С. 531–543. DOI: 10.7868/S0321059613060035
23. *Митракова Н.В.* Влияние морфологических особенностей строения речной сети на характеристики речного стока // *Географическое изучение территориальных систем*. 2018. С. 151–152.
24. *Демидов В.В., Щеголькова Н.М., Во Дай Хай, Коа Пхунг Ван, Бао Хай.* Анализ, оценка и пути рационального использования земель Северного Вьетнама (на примере территории водосборного бассейна Суой Сан) // *Экосистемы: экология и динамика*. 2019. Т. 3. № 3. С. 105–115.
25. *Угбонг И.А.* Использование индекса плотности дренажа для определения точек затопления: на примере территории Калабар, Нигерия // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2019. № 4 (42). С. 56–61. DOI: 10.25714/MNT.2019.42.008
26. *Безухов Д.А., Голосов В.Н., Панин А.В.* Оценка коэффициента доставки наносов малых водосборов в лесостепных и степных районах Восточно-Европейской равнины // *Известия Российской академии*

наук. Серия географическая. 2019. № 4. С. 73–84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84

27. 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.

28. Шереметов Р.Т. Морфометрическая характеристика речного бассейна как экологический фактор флористического разнообразия // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. 2019. № 25. С. 115–127.

29. Анохина В.С., Дунаева А.О. Показатели экстерьеры и индексы физиологических признаков молоди salmosalar l. рек Кольского полуострова // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20. № 2. С. 401–411. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-2-401-411

30. Mendez W., Pacheco H., Cartaya S., Marcano A., León C. Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica // Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. 2015. Vol. 24. Issue 2. Pp. 133–156. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50213

31. Kamel K., Bachir S. Morphometric analysis of river subwatersheds using geographic information system and principal component analysis, northeast of Algeria // Revista de Geomorfologie. 2017. Vol. 19. Issue 1. Pp. 155–172. DOI: 10.21094/rg.2017.018

32. Rodriguez Vazquez S., Mokrova N. Spatial analysis methodologies using multicriteria evaluation approaches // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 99 (7). P. 9902. DOI: 10.18720/MCE.99.2

Поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 24 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Родригес Васкес Соланхель — магистр информатики, аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-code: 8908-2665, Scopus: 57195495075, ResearcherID: ABI-4578-2020, ORCID: 0000-0001-6250-1108; solrusita85@gmail.com;

Наталья Владиславовна Мокрова — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и электроснабжения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-code: 5157-9790, Scopus: 41762121300, ORCID: 0000-0002-8444-2935; mokrovanv@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Regions that suffer from insufficient water resources have certain hydrographic characteristics. The stability of existing ecosystems, characteristics of specific water bodies should be taken into account in the process of human economic activities, including the construction of hydraulic structures needed to provide the population with water. The study of the geomorphological features of the watershed makes it possible to solve the problems associated with the lack of information about the uniqueness of the region. The awareness of hydrological, hydraulic and hydrodynamic features allows to consider future dam projects, since it is possible on condition of carefully tracked hydrological changes, runoff and erosion processes that have an impact on the environment in the study area.

Physical indicators (geology, climate, topography, soil, vegetation) of the drainage network of the watershed are a condition for the occurrence of a water flow in natural drainages, dynamically responding to them and determining their regime. A morphometric analysis makes it possible to interpret and predict the hydrologi-

cal features of the watershed; this analysis is performed by obtaining morphometric indices, starting with the shape of the basin, the drainage network and the terrain.

Morphometric characteristics make it possible to numerically evaluate and characterize drainage basins and subsequently apply mathematical methods to substantiate the choice of regions with favorable conditions for the construction of water collectors. A complex multi-parameter function that determines the hydrological regime of a catchment or a basin, primarily depends on the climate and geo-form of the area. The shape of the earth's surface, its altitude have a decisive influence on the hydrological regime; they are also determined by precipitation, runoffs, infiltration, sediment formation, etc. Morphometry is crucial for documenting the territorial similarity and hydrological generalization, since it employs simple terms to describe complex landscapes.

The purpose of the study is to substantiate the choice of a number of morphometric and hydrological parameters, which will serve as the basis for the multi-criterial analysis needed to make a choice from the available alternatives when assessing the potential location of hydraulic structures.

As for the construction of a dam, it is necessary to conduct a thorough exploration of the study area in order to identify the features of the terrain. This first step allows to identify the problems of the basin under consideration, the availability and potential resources of the area, characterizing various production activities and reflecting, among other things, prospects for the future development. This information package should contain as much information as possible concerning water, soil and climatic resources, as well as the information, related to production activities, industry, ecology, land use and others. The next step is the application of the mathematical apparatus, algorithms, methods of the theory of decision-making for selecting the priority dam construction area.

MATERIALS AND METHODS

The critical analysis of bibliographic sources has made it possible to propose the following morphometric and hydrological parameters, which will serve as the basis for decision-making algorithms used to substantiate the feasibility of construction of hydraulic structures.

E. Abushand et al. [1], P. Rezaei et al. [2], J. Chezgi et al. [3], V.N. Shevchenko et al. [4], E.D. Vishnyakova [5], A.O. Pagan et al. [6], R.T. Sheremetov et al. [7], Yu.A. Padalko [8] use parameters in relation to the type of research they undertake to analyze a particular water basin. At the same time, all studies coincide in the number of parameters, which are constant in this analysis:

1. Hydrological aspects of the study area

1. The length of the main stream L_m is a measure of the main runoff of the catchment area from its top part to the mouth; as a rule, this parameter affects the majority of morphometric parameters. Longer length means longer flood travel time and, as a consequence, higher attenuation, so the rise time and the total flood duration will obviously be longer. The parameter takes into account irregularities and bends of the water channel¹.

2. The slope of the main stream P_{av} is the ratio of the total height of the main channel to its length. This parameter is important, as it allows to calculate the index of the average flow speed, resistance and erosion in the catchment area. A greater slope and high water velocity are associated with the hydraulic mode² [9].

3. The time of the runoff concentration T_c is the conventional travel time of a rainwater drop flowing superficially from the farthest point of the catchment. It is defined as the minimum time required for all catchment points to simultaneously deliver wastewater to the outlet, the discharge point or the shut-off point. For the purpose of calculating the parameter, different formulas can be used depending on other parameters of the catchment

area. To estimate the concentration time, it is recommended to use several empirical equations available in the research literature [10–12].

$$\text{California U.S.B.R.: } T_c = 0.066 \left[\frac{L_m}{\sqrt{P_{av}}} \right]^{0.77}; \quad (1)$$

$$\text{Clark: } T_c = 0.335 \left[\frac{A}{P_{av}^{0.5}} \right]^{0.593}; \quad (2)$$

$$\text{Passini: } T_c = \frac{[0.108 (AL_m)^{0.33}]}{P_{av}^{0.5}}; \quad (3)$$

$$\text{Pilgrim: } T_c = 0.76A^{0.38}, \quad (4)$$

where T_c is the concentration time, h; L_m is the length of the longest watercourse, km; P_{av} is the average slope of the main channel, m/m; A is the catchment area, km².

4. Assessment of the rate of maximal discharge in the catchment area Q_d . There are many methodologies for determining the maximal runoff in a catchment, some of which use historical hydrometric records, while others, more commonly used, rely on the rainfall information used to obtain maximal runoff; it is more often called a rainfall runoff. A rational method is employed as an assessment method [13].

A rational method is usually applied to small reservoirs. However, this method is also applied in the case of medium-sized catchments, if the necessary minimal hypotheses are selected. In order to estimate maximal flows using the rational method, it is assumed that precipitation around the catchment has uniform intensity, and the value of the coefficient represents the entire flow drainage area. After evaluating all the parameters required for calculating maximal flow rates, they are assessed according to equation [13]:

$$Q_d = 0.278CIA, \quad (5)$$

where is Q_d is the maximal flow rate, m³/s, for a given return period T_c ; C is the runoff coefficient; I is intensity, mm/h; A is the area, km².

5. The runoff coefficient C is the ratio of the precipitation circulating in the water surface to its total amount, provided that the surface portion of the water is smaller than the total amount of precipitation during evaporation, evapotranspiration, etc. The runoff coefficient depends on many factors: the type of precipitation, their quantity, intensity and distribution in time; initial soil moisture, soil type (particle size distribution, texture, structure of the organic matter, degree of compaction, slope, relief, roughness), type of vegetation, etc. The runoff coefficient can take values from zero to one [14].

¹ Chebotarev A.I. Rivers. *Formation of the hydrographic network and river systems. The main elements of river systems*. URL: <http://abratsev.ru/hydrosphere/rivers1.html>

² Parakhnevich V.T. *Hydraulics, hydrology, hydrometry of watercourses*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2017.

6. Rain intensity I is the amount of water, mm, that falls per unit of time³:

$$I = \frac{615 T_r^{0.18}}{(D+5)^{0.685}}, \quad (6)$$

where I is the intensity of precipitation; T_r is the return period for which the analysis is carried out; D is the average duration of precipitation.

7. Return period (years) T_r .

In applied hydrology, the concept of probability $p(x)$ and the return period T_r are used interchangeably; T_r is understood as the percentage of occurrence of extreme events; therefore, if an extraordinary event occurs (on average) every T_r years, its probability is $\frac{1}{T_r}$. These concepts are related to formula⁴:

$$p(x) = \frac{1}{T_r}. \quad (7)$$

In hydrology, the return period is used more frequently than the probability.

8. Average precipitation duration, min, D .

The parameter is a coefficient that can be set by an expert, depending on the purpose of the project; it corresponds to the average duration of precipitation in the study area [15].

9. The hydrographic length of a watercourse L_c is a hydrographic characteristic that expresses the length of the main course of a watercourse from the source to the mouth⁵.

10. Annual potential evapo-transpiration rate E_p .

Several empirical methods are used to calculate this variable, most of them are based on the formulas obtained in the climatic conditions different from the tropical ones. One method used in tropical climates is the Cenicafé – Budyko method [16]. It calculates the potential evapo-transpiration coefficient based on the altitude above the sea level. Equation (8) is obtained by applying regression to the values obtained by the Penman method to the data registered by the climate observing stations [17]:

$$E_p = 1700.17^{-0.0002h}, \quad (8)$$

where is E_p the annual potential evapo-transpiration, mm/years; h is the altitude above the sea level, m.

11. Real evapo-transpiration E_R .

Potential evapo-transpiration is converted into real evapo-transpiration using the Budyko formula, which is presented in equation (9) [18]:

$$E_R = \bar{P} \left[\left(1 - \cos h \frac{E_p}{\bar{P}} + \sin h \frac{E_p}{\bar{P}} \right) \frac{E_p}{\bar{P}} \tan h \frac{\bar{P}}{E_p} \right]^{0.5}, \quad (9)$$

where is E_R real evapo-transpiration; E_p is potential evapo-transpiration; $\bar{P}$ is average annual precipitation over the catchment area, mm/years.

It is obvious that $E_R \leq E_p$. In a desert, E_R can reach 6 mm/day, as well, while $E_R = 0$ since there is no water for evapo-transpiration. The values are the same as long as soil humidity is optimal and plants develop in a normal manner. This occurs in a well-irrigated agricultural field or in an area with natural vegetation during the period of sufficient rainfall.

12. Average annual precipitation in the catchment area $\bar{P}$ [19].

13. The sinuosity coefficient of a river section S_i is the ratio between the length of the river along its bed and the length of the valley, measured along a curved or a straight line. The sinuosity coefficient allows to measure the flow rate of a stream⁶:

$$S_i = \frac{L_m}{L_v}, \quad (10)$$

where S_i is sinuosity; L_m is the length of the main river; L_v is the length of the valley. If $S_i \leq 1.25$, this indicates low sinuosity; if $S_i > 1.25$, then sinuosity is more pronounced, and the higher the sinuosity coefficient, the lower the flow velocity.

14. The average annual precipitation in the catchment area V is equal to⁷:

$$V = 1000 \bar{P} A, \quad (11)$$

where is V average precipitation intensity in the catchment area, m³/s; $\bar{P}$ is the average annual precipitation amount in the catchment area, mm; A is the size of the catchment area, km².

15. River stability coefficient C_E .

The parameter, proposed by Schumm S.A.⁸ and Chalov R.S. [20], represents a surface necessary to maintain stable hydrological conditions:

$$C_E = \frac{A}{\sum L_c}, \quad (12)$$

where C_E is the coefficient of river stability; A is the catchment area; $\sum L_c$ is the sum of the channel lengths that are integrated in the catchment.

³ Singh V.P., Chow V.Te. *Handbook of applied hydrology*. New York, McGraw-Hill, 2017.

⁴ Return period. 2020. URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Return_period

⁵ Guidelines for the determination of hydrographic characteristics by the cartometry method, approved by Goskomgidromet. Electronic Foundation of laws and regulations. 1986. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200077599>

⁶ Determination of the morphometric characteristics of water bodies. 2020; 7. URL: <https://poznayka.org/s30887t1.html>

⁷ Fattorelli S., Fernandez P.C. *Hydrological design. Second edition*. Zaragoza. Spain. Water Assessment & Advisory Global Network, 2011.

⁸ Schumm S.A. *Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy*. New Jersey. GSA Bull. GeoScienceWorld, 1956; 67(5):597-646. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:codsas]2.0.co;2

16. The order of the rivers O_R .

The order determines the number of arms in the catchment. For this classification, one can use the Gravellius method⁹, who believes that the biggest river should be the first order river, its tributaries should be treated the second order rivers, etc. The order represents a high degree of bifurcation, which corresponds to soils with high slopes prone to erosion. Another methodology for determining the order was proposed by Horton-Strahler [21] and it is widely known in hydrology. First-order streams are the main streams, when two first-order streams consolidate, they create a second-order stream, and when two second-order streams consolidate, they create a third-order streams, etc. It is noteworthy that, when two streams of different orders are combined, they are dominated by higher order [22].

The parameter has a close relationship with the amount of arms in a drainage network, the higher the order, the higher the erosive potential of the deposit transfer and, therefore, the bigger the direct flow component than the one is the catchment area that has similar dimensions.

17. Spill ratio C_l is the ratio of the number of first-order waterways to the size of the catchment area. The bigger the first-order arm number and the smaller the area, the higher the catchment coefficient¹⁰. Water quickly enters the channels, and the discharge rate is higher. Let's formulate the relation¹¹:

$$C_l = \frac{\sum O_{R1}}{A}, \quad (13)$$

where is C_l the coefficient of spillage; O_{R1} is the number of streams of the first order; A is the size of the catchment area.

18. The average discharge E_m .

The parameter that is calculated for a long period of time using hydrometric observation data, in the absence of information, it is calculated using the water balance equation adapted to each region, as well as formulas and equations obtained using the hydrological data.

19. The runoff factor E_s is the runoff generated by precipitation which can be obtained using the rational method¹².

$$E_s = \frac{CIA}{360}, \quad (14)$$

where E_s is the flow value; C is the runoff coefficient; I is the intensity of precipitation; A is the size of the catchment area.

II. Topographic aspects of the study area

1. The catchment area A .

It corresponds to the surface limited by the watershed of the study area, km². This value is very important because the error in its measurement directly affects the results of the catchment analysis. It is one of the criteria used to measure the runoff; under normal conditions, the instantaneous average, minimum and maximum discharges grow with the growth of the catchment area, the other dependence is that the larger the catchment area, the greater the length of [6].

2. The perimeter of the catchment area P .

The parameter is considered as the dividing line of the studied catchment area; it is expressed in meters or kilometers. The parameter alone does not provide any information about the size or shape of the catchment, but when catchments having equal areas are compared, the value of the perimeter can give an idea of its shape. Besides, P used to calculate other parameters such as the compactness factor [23].

If the size of a catchment area is identified, then its perimeter can be compared, for example, with the circumference, in order to obtain the indices, which will then be analyzed to indicate a longer or shorter part of this perimeter. The perimeter and its shape are closely related to the lithology and age of the drainage catchment. Soft rock will ensure a rounded shape, while harder materials stand for lobed shapes. The trend, pursued by the catchments, is to obtain rounded shapes having equal lithology, a rounded catchment has the potential for development [23].

3. The catchment compactness factor K_c is the ratio of the catchment perimeter in km to the perimeter of the circle of the area equal to the drainage area of the catchment. The coefficient of compactness quantitatively represents the geometry of the catchment and for elongated or irregular catchments it is slightly above one [24]:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}, \quad (15)$$

where P is the perimeter; A is the size of the catchment area. $K_c > 1$ means the probability of occurrence of peak flow rates. The closer its value is to 1, the more compact the catchment is. The catchment area with K_c closer to 1 has a potential risk of growth and development of floods.

4. The catchment shape factor K_f quantitatively represents the catchment geometry, it is the ratio of the catchment area to the main flow length, if it is squared¹³.

⁹ Guide to hydrological practice. Volume I of hydrology: from measurements to hydrological information. Geneva, World Meteorological Organization, 2008.

¹⁰ Díaz M.A.R., Bermúdez F.L. Morphometry of river networks: Critical review of the most used parameters and application to the Alto Guadalquivir. *Papeles Geogr.* 1987; 12:47-62.

¹¹ Córdova M. *Geomorphological parameters of river basins*. 2018. URL: <https://www.prontubeam.com/articles/2018-09-11-Geomorphological-parameters-of-river-basins/>

¹² Thomason P.E.C. *Hydraulic design manual.onlinemanuals*. 2019. URL: http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/rational_method.htm

¹³ Sverguzoza S.V., Saprionova Zh.A. *Introduction to Hydrology*. URL: <https://studfile.net/preview/1971369/>

$$K_f = \frac{A}{L_m^2}, \quad (16)$$

where A is the size of the catchment area; L_m is the length of the main stream. $K_f < 1$ characterizes the elongated shape of catchments, while a catchment having a low shape factor is less prone to growth or extreme events.

5. The average slope of the catchment P_m is the index that represents the average slope of the river flow trajectories, m/m. The average slope largely controls the rate of the surface runoff and influences the water collection time in the beds that are part of the drainage network of the catchment⁹.

6. The density of the river catchment network D_d .

It is an important indicator of the shape of the area and the degree of erosion of the catchment area, depending on geological factors, vegetation factors and the soil type. A good basic topographic catchment map should correctly represent the drainage density. Quantitatively, this is the ratio of the length of catchment waterways to its total area¹⁴ [25]:

$$D_d = \frac{\sum L_c}{A}, \quad (17)$$

where L_c is the length of water flows, km; A is the total surface area of the catchment, km². D_d typically ranges between 0.5 km/km² for poorly drained catchments and up to 3.5 km/km² for exceptionally well drained catchments.

The indicator is especially significant because it reflects the influence of geology, topography, soils and vegetation on the watershed and it is related to the time needed for the surface runoff to leave the catchment. A high drainage density value is indicative of a well-drained catchment, which should respond relatively quickly to rainfall inflows. A catchment with a low drainage density value features a poorly drained area with a slow hydrological response [25].

7. Average catchment altitude A_m .

Changes in the catchment altitude directly affect the climate and, therefore, the hydrological regime, and provide a basis for characterizing different climatological and ecological zones within the same catchment. It is a user-friendly and objective way to describe the relationship between the in-plane altimetry-focused property of a catchment and its elevation using the hypsometric function.

8. The length of the catchment area L_v .

It is determined by the length of its main channel, the equivalent distance between the starting point of the downstream flow and the farthest topographic starting point of the upstream flow [26].

9. The average width of the catchment w is the ratio of the drainage area of the catchment to its length [27]:

$$w = \frac{A}{L_v}, \quad (18)$$

where A is the catchment surface, km²; L_v is the catchment length, km.

10. Watershed line development coefficient I_A .

It connects the length of the channel and the maximal width of the catchment area. It determines whether the catchment is elongated when its value is much greater than one, or flattened when the values are less than one [28]:

$$I_A = \frac{L_v}{w}, \quad (19)$$

where I_A is the elongation index; L_v is the catchment length, km; w is the width of the catchment area, km.

III. Geological aspects of the study area

1. Solidness index K_m .

This parameter shows the state of the catchment as to whether it is a mountain catchment or vice versa. The following equation is used for this purpose [29, 30]:

$$K_m = \frac{A_m}{A}, \quad (20)$$

where K_m is the coefficient of solidness; A_m is the average height of the catchment area; A is the catchment area.

2. Orographic coefficient C_o .

The parameter expresses the catchment degradation potential and takes account of the altitude above the sea level, which directly affects the potential water flow, and the area, whose inclination has a direct effect on the surface runoff. The following formula is used to calculate its value [31]:

$$C_o = \frac{A_m^2}{A}, \quad (21)$$

where C_o is the orographic coefficient; A_m is the average catchment altitude; A is the size of the catchment area. If $C_o < 6$, the potential for catchment degradation is low.

IV. Land use aspects of the study area

1. Delineation of areas suitable for hydraulic structures P_a .

Dam construction process has a number of negative aspects at the economic, social and environmental levels, including:

- disturbance of the biological diversity of forests due to deforestation of areas that will accommodate the reservoir;
- forced displacement of the population living in these areas;
- potential floods caused by climatic factors or the dam failure;

¹⁴ Rozhdestvensky A. V., Lobanov A. G. *Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observation data*. St. Petersburg, Nestor-History publishing house, 2009; 193.

- impact on adjacent areas: disruption of the transport infrastructure, loss of tangible property by both individuals and the state, loss of agricultural land and crops, etc.

The delineation of areas suitable for the terrain analysis is carried out using mathematical methods and computational algorithms. This approach allows experts to compare options, make an informed choice and decision-making in terms of construction of hydraulic structures. However, it is noteworthy that the proposed parameters represent the source information used by decision-making algorithms, they limit the distance between the study areas and protected areas, taking into account many alternative criteria. The well-grounded choice of initial parameters and bottlenecks, the formulation of analytical factors make it possible to avoid long-term wrong decisions or substantial costs associated with the wrong choice of the future site that may accommodate construction of hydraulic structures.

RESULTS OF THE RESEARCH

The choice of a priority area or a region for the dam construction, whether a catchment, a basin, a flow unit, is based on the multi-criterial decision-making optimization based on complex parameters and their interconnection.

The Municipality of Manicaragua, located in the province of Villa Clara, Cuba, was the study area chosen to test the parameters used to identify the priority areas. The municipality of Manicaragua has a surface area of 1,064.4 km², and 309 km² of its terrain represents a river plain and slightly rugged foothills. The area is considered to be at risk of flooding, in particular, the Jibacoa valley that has the size of 12 km², heavy rains isolated the area of 176 houses there, and as a result, 486 people were evacuated because of the river level rise.

When performing a computational experiment, the information obtained by the geoinformation systems was taken as the source data for research purposes.

The information about parameters was extracted from the layers (.shp) related to the subject of research performed using QGIS. Hybrid multi-criterial analysis method AHP-TOPSIS (Fig. 1) was used; it structures the decision-making problem hierarchically (Fig. 2) and encompasses the following fundamental aspects:

1. Decision-making criteria $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, can be defined as conditions or parameters that allow to distinguish between the alternatives and set the preferences of the decision maker; these are the standards on the basis of which the decision is made.

2. Weights (weighing) are the indicators of relative importance, which are vital for the decision-maker. We set the vector of weight $[w] = [w_1, \dots, w_n]$, n is the number of criteria. Weight w_i reflects the relative importance of criterion C_i in terms of the decision and it is considered positive.

3. Alternatives are different approaches to solving the problem. The set of alternatives is indicated as $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, where $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ is each of the possible alternatives. Each set of alternatives A represents different, exclusive and exhaustive alternatives.

4. Evaluation or decision matrix (see the table). Having set the criteria and related weights, a decision-maker can attribute a numeric or symbolic value a_{ij} to each of the criteria considered for each alternative, expressing an opinion or judgment of alternative A_j in respect of criterion C_j . This assessment can be numerical or verbal, and it is presented as a matrix, an assessment matrix, or a decision matrix. Each row of the array expresses the quality of alternative A_j in relation to criteria under consideration. Each column of the matrix contains assessments or judgments considered to be the best of all the alternatives according to criterion C_j .

When matrices are ready, a pairwise comparison is made between each alternative (research areas) for each of the pre-set parameters, and then, in accordance with the weights obtained for each alternative, the order of prioritization of areas is established.

Fig. 1. AHP-TOPSIS diagram

Fig. 2. Hierarchization of parameters in the process of analyzing alternatives to determine land site priorities

The calculation of value R_i for each alternative A_j is performed using the following equation:

$$R_i = \sum_j w_j r_{ij}, \quad (22)$$

where R_i is performance obtained for one of the alternatives A_j ; w_j is the weight corresponding to each criterion C_j ; r_{ij} is the priority vector obtained by comparing A_j to each of C_j .

The proposed algorithm (Fig. 1) includes the identification of the assessed criteria, according to the pre-set hierarchy (pairwise comparisons and calculation of criteria weights). It is noteworthy that the time of the runoff concentration T_c , the order of the river O_R , the coefficients of compactness K_c and shape K_f of the catchment area, as well as the solidness index K_m , according to the expert assessment, are classified as of the highest importance.

Paired matrices are obtained for evaluating weights and constructing a hierarchy of criteria. The Analysis Hierarchy Method (AHP) evaluates the consistency of a pairwise comparison matrix. In [32], the authors analyze methods of computational spatial analysis and multicriterial assessment, propose approaches and computational technologies using MATLAB.

Given the joint application of advantages of the AHP-TOPSIS pattern (Fig. 1), results were obtained in the course of a computational experiment in respect of the choice of priorities among sub-criteria; local and global priorities were established among the alternatives, a weighted normalized matrix of decisions was obtained, positive and negative ideal solutions, as well as the distance between them were identified. Therefore, the implemented calculation algorithm allows to evaluate each alternative solution and implement the priority areas in accordance with the pre-set ranking system.

Fig. 3. Selection of areas suitable for the construction of hydraulic structures

Following the multi-criterial analysis of priority areas, performed using selected parameters, their number was reduced to 23 % (Fig. 3).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The objective of water resources accessibility entails the construction of reservoirs. Their construction is associated with costs and benefits, negative and positive impacts on the environment. The study of parameters, factors and criteria related to potential construction sites is important for their assessment in the course of the decision-making process. For example, the pre-project study of geotechnical characteristics and properties of the bedding may only be carried out on site. This study enables specialists to reduce the project location area so that they do not waste time analyzing unsuitable sites. Thus, other analyses to be carried out on location would be more effective, since the area will be considered suitable from the point of view of hydrology.

Four leading experts, employed with a research department of a provincial institute of hydraulic engineering, were selected to decide upon the criteria and the main goal. The experts decided to use 32 parameters as sub-criteria, distributed among four fundamental criteria, as shown in Fig. 2. The alternatives, that were assessed and

compared, included 29 hydrological basins similar to those located in the municipality of Manicaragua. They were analyzed hierarchically using the AHP-TOPSIS method. Areas, that had rivers, were studied (their total number reached 12,591), each studied area had a basin. The land use criteria was employed to reduce the total number of studied areas to 23% in such a way not to affect the areas that are defined as protected zones for environmental reasons, as well as industrial zones, urban built-up areas, etc. Subsequently, the river areas thus obtained as potential construction sites designated for hydraulic structures, are organized hierarchically depending on the hydrological basins they have.

The loss of information is minimal in the process of working with these parameters, since they are variables extracted from the digital model, while others, in turn, were calculated using the QGIS geographic information system.

This multi-criterial analysis can be used to prioritize the areas to be disturbed at the levels of the basin, the catchment and the flow unit, depending on the size and purpose of the project. First of all, it is important to have a digital terrain model on a scale, which will make it possible to obtain more accurate morphometric parameters of both linear and formal models.

REFERENCES

1. Abushandi E., Alatawi S. Dam site selection using remote sensing techniques and geographical information system to control flood events in tabuk City. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*. 2015; 06(01). DOI: 10.4172/2157-7587.1000189
2. Rezaei P., Rezaie K., Nazari-Shirkouhi S., Tajabadi M.R.J. Application of fuzzy multi-criteria decision making analysis for evaluating and selecting the best location for construction of underground dam. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2013; 10(7):187-205. DOI: 10.12700/aph.10.07.2013.7.13
3. Chezgi J., Pourghasemi H.R., Naghibi S.A., Moradi H.R., Zarkesh M.K. Assessment of a spatial multi-criteria evaluation to site selection underground dams in the Alborz Province, Iran. *Geocarto International*. 2016; 31(6):628-646. DOI: 10.1080/10106049.2015.1073366
4. Shevchenko V.N., Demchenko E.R. Morphometric characteristics of the Tikhaya Sosna River. *Vector of Geosciences*. 2018; 1(1):59-61. (rus.).
5. Vishnyakova E.D. Morphometric characteristics of the karachan river basin. *Derzhavin Forum*. 2019; 3(10):198-203. (rus.).
6. Pagin A.O., Baryshnikov N.B., Demidova Yu.V., Selina T.S. Morphometric characteristics of the river basin, flood-plain, and channel, and sediment transport by streams. *Geomorphology*. 2015; 4:80-85. DOI: 10.15356/0435-4281-2010-4-80-85 (rus.).
7. Sheremetov R.T., Galakhov V.P. Influence of morphometric parameters of river basins on taxonomic richness of flora (by the example of the tom river basin). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2020; 2:76-89. DOI: 10.36906/2311-4444/20-2/10 (rus.).
8. Padalko Yu.A. Morphometric peculiarities of river basins of the steppe zone of the orenburg region. *Steppe Science*. 2016; 10:62-65. (rus.).
9. Shumie M.C. River slope and roughness impact on downstream hydraulic structures. *Journal of Earth Science & Climatic Change*. 2018; 9(11). DOI: 10.4172/2157-7617.1000500
10. Solodovnikov A.B. Methods of estimating the time of concentration in small watersheds. *Designing the Development of the Regional Railway Network*. 2018; 6:32-57. (rus.).
11. Sandoval-Erazo W., Toulkeridis T., Rodríguez-Espinosa F., Mora M.J.M. Velocity and time of concentration of a basin — A renewed approach applied in the Rio Grande Basin, Ecuador. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 191:012117. DOI: 10.1088/1755-1315/191/1/012117
12. Solodovnikov A.B. Time of concentration for watershed and affecting factors. *Designing the Development of the Regional Railway Network*. 2017; 5:78-91. (rus.).
13. Solodovnikov A.B. The description of storm water runoff calculations with the rational method. *Designing the Development of the Regional Railway Network*. 2014; 2:93-101. (rus.).

14. Palagin E.D., Bykova P.G., Shuvalov M.V., Tarakanov D.I., Tsylin A.V. Designing surface runoff control schemes. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2015; 12:73-80. (rus.).
15. Kapustin A.V., Kolbin V.A., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Estimation of duration and intensity of shelves on radar location characteristics of the cloudy. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeikova*. 2018; 589:114-124. (rus.).
16. Osejo B.B., Vargas T.B., Martinez J.A. Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from Worldclim and Chelsa datasets: Improving long-term water balance at the watershed-scale in the Urabá region of Colombia. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2019; 14(02):105-117. DOI: 10.2495/SDP-V14-N2-105-117
17. Ponkina E.V., Rossova A.S., Gerspumer K.Yu., Bondarovich A.A., Schmidt G., Illiger P. Approaches to the assessment of potential evapotranspiration. *Proceedings of the seminar on Geometry and Mathematical Modeling*. 2019; 5:125-133. (rus.).
18. Kozyreva L.V., Dobrokhoto A.V. Rational use of water resources with automated calculation of irrigation of crops on an irrigated field. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020; 1:92-107. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-1-6 (rus.).
19. Mukhin V. Methodological basis of physical-statistical kinds of short-term forecasts of the runoff of mountain rivers. *Proceedings of the Hydrometeorological research center of Russian Federation*. 2013; 349:5-46. (rus.).
20. Chalov R.S. Different approaches to evaluation of riverbed stability. *Geomorfologiya*. 2012; (2):18-25. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-2-18-25 (rus.).
21. Lobanov G.V., Sabayda E.A., Trishkin B.V., Zvereva A.U., Polyakova A.V., Novikova M.A. et al. Approaches to the assessment of small hydropower potential (on the example of the upper basin of the Dnieper). *BSU Herald*. 2014; 4:117-126. (rus.).
22. Alekseevskii N.I., Kositskii A.G., Nosan' V.V., Khristoforov A.V. Similarity of rivers and their systems. *Water Resources*. 2013; 40(6):561-572. DOI:10.7868/S0321059613060035 (rus.).
23. Mitrakova N.V. Influence of morphological features of the structure of the river network on the characteristics of river flow. *Geographic Study of Territorial*. 2018; 151-152. (rus.).
24. Demidov V.V., Shchegolkova N.M., Vo Dai Hai, Phung Van Khoa, Bao Huy. Analysis, evaluation and ways for rational land management of north vietnam (Suoi Sap catchment basin). *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2019; 3(3):105-115. (rus.).
25. Ugbong I.A. Using the drainage density index to identify points of flood occurrence: the case of Calabar territory, Nigeria. *Monitoring. Science & Technologies*. 2019; 4(42):56-61. DOI: 10.25714/MNT.2019.42.008 (rus.).
26. Bezukhov D.A., Golosov V.N., Panin A.V. Evaluation of the sediment delivery ratio of small watersheds in the forest-steppe and steppe regions of the Russian plain. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019; 4:73-84. DOI: 10.31857/S2587-55662019473-84 (rus.).
27. Pankratyev P.S., Shakirov V.A. Multiattribute choice of hydroelectric station dam site on the Indigirka River, the Sakha Republic (Yakutiya). *Systems. Methods. Technologies*. 2012; 3(15):71-80. (rus.).
28. Sheremetov R.T. Morphometric characteristics of the river basin as a factor of floral diversity. *Botanical research in Siberia and Kazakhstan*. 2019; 25:115-127. (rus.).
29. Anokhina V.S., Dunaeva A.O. Exterior indicators and physiological signs indices of juveniles salmon I. In the rivers of the Kola peninsula. *Vestnik of MSTU*. 2017; 20(2):401-411. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-2-401-411 (rus.).
30. Mendez W., Pacheco H., Cartaya S., Marcano A., León C. Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 2015; 24(2):133-156. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50213
31. Kamel K., Bachir S. Morphometric analysis of river subwatersheds using geographic information system and principal component analysis, northeast of Algeria. *Revista de Geomorfologie*. 2017; 19(1):155-172. DOI: 10.21094/rg.2017.018
32. Rodriguez Vazquez S., Mokrova N. Spatial analysis methodologies using multicriteria evaluation approaches. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 99(7):9902. DOI: 10.18720/MCE.99.2

Received February 25, 2021.

Adopted in revised form on May 24, 2021.

Approved for publication on May 24, 2021.

BIONOTES: **Rodriguez Vazquez Solangel** — Master in Computer Science, postgraduate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8908-2665, Scopus: 57195495075, ResearcherID: ABI-4578-2020, ORCID: 0000-0001-6250-1108; solrusita85@gmail.com;

Nataliya V. Mokrova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Power Supply; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5157-9790, Scopus: 41762121300, ORCID: 0000-0002-8444-2935; mokrovanv@mgsu.ru.