



ИНТЕГРАЦИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Каличкин В.К., Логачёва О.М., Сигитов А.А., Гарафутдинова Л.В.

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

Обоснована целесообразность совместного применения методов многокритериального анализа решений (МКАР) и геоинформационных систем (ГИС) с целью оценки пригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур. Реализация этого подхода даст возможность частично автоматизировать процесс оценки земель. Исследования проведены на территории ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области (54°56'24" с.ш., 82°06'12" в.д.), расположенного в лесостепной зоне. С учетом особенностей рассматриваемой территории отобраны критерии для оценки пригодности земель: дренированность, гранулометрический состав почв, контрастность почвенного покрова, контурность рабочих участков, мощность гумусового слоя, распаханность, угол уклона рельефа, экспозиция склонов, эродированность. Источником пространственной информации послужили карты землеустройства хозяйства, почвенные и топографические карты, цифровая модель рельефа (ЦМР), SRTM, космические снимки сверхвысокого разрешения. Сбор и обработка пространственной информации осуществляются в ГИС QuantumGIS (QGIS), имеющей открытую модульную архитектуру. Для аналитической оценки информации из ряда МКАР отобраны ELECTRE TRI и метод анализа иерархий. Для обоих методов известны процедуры, интегрированные с QGIS. С помощью инструментов ГИС QGIS землепользование конкретного сельскохозяйственного предприятия было разделено на рабочие участки, определены их границы и площади. По каждому критерию описана методика получения атрибутивной базы данных. Проведен обзор методов ELECTRE TRI и метода анализа иерархий, а также описаны их процедуры запуска в QGIS. С помощью метода анализа иерархий (процедура Easy AHP в QuantumGIS) получены веса критериев, главный результат – карта пригодности земель (по классификации FAO) – получена с помощью метода ELECTRE TRI (процедура ELECTRE TRI для QuantumGIS). Так как результатом процедуры ELECTRE TRI являются две карты решений: по пессимистическому и оптимистическому сценарию, были проведены дополнительные исследования, на основании которых удалось установить, что карта, полученная по оптимистическому сценарию, имеет большую согласованность с природными условиями хозяйства.

Ключевые слова: геоинформационные системы, многокритериальный анализ решений, сельскохозяйственные земли

GEOINFORMATION SYSTEM INTEGRATION AND METHODS OF MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF LAND SUITABILITY FOR AGRICULTURAL USE

Kalichkin V.K., Logacheva O.M., Sigitov A.A., Garafutdinova L.V.

Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation

The expediency of joint application of methods of multi-criteria decision analysis (MCDA) and geoinformation systems (GIS) in order to assess the suitability of lands for cultivation of agricultural crops is substantiated. The implementation of this approach will make it possible to partially automate the process of assessing land. The studies were carried out on the territory of ZAO Mirny, Kochenevsky District, Novosibirsk Region (54°56'24" N, 82°06'12" E), located in the forest-steppe zone. Taking into account the peculiarities of the territory under consideration, the following criteria were selected for assessing suitability of lands: drainage condition, soils granulometric composition, contrast of soil cover, working areas elevation pattern, humus layer thickness, ploughness, terrain slope angle, exposure of slopes, erosion degree. The sources of spatial information were land management maps, soil and topographic maps, digital elevation model (DEM), SRTM, ultra-high resolution satellite images. The collection and processing of spatial information was carried out in QuantumGIS (QGIS), which has an open modular architecture. ELECTRE TRI and the hierarchy analysis method were selected for the analytical assessment of information within MCDA. For both methods, there are procedures that are integrated with QGIS. With the help of QGIS GIS tools, the land use of a particular agricultural enterprise was divided into working areas, their boundaries and areas were determined. A method for obtaining an attribute database is described for each criterion. An overview of the ELECTRE TRI methods and the hierarchy analysis method is given, and their launch procedures in QGIS are described. The criteria weights were obtained using the hierarchy analysis method (Easy AHP procedure in QuantumGIS), and the main result – the land suitability map (according to the FAO classification) – was obtained using the ELECTRE TRI method (ELECTRE TRI procedure for QuantumGIS). Since the result of the ELECTRE TRI procedure are two decision maps: according to the pessimistic and optimistic scenarios, additional studies were carried out, on the basis of which it was possible to establish that the map obtained according to the optimistic scenario has a greater consistency with the natural conditions of the agricultural enterprise.

Keywords: geoinformation systems, multi-criteria decision analysis, agricultural land

Для цитирования: Каличкин В.К., Логачёва О.М., Сигитов А.А., Гарафутдинова Л.В. Интеграция геоинформационной системы и методов многокритериального анализа решений для оценки пригодности земель сельскохозяйственного использования // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020. Т. 50. № 6. С. 93–105. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-6-11>

For citation: Kalichkin V.K., Logacheva O.M., Sigitov A.A., Garafutdinova L.V. Geoinformation system integration and methods of multi-criteria decision analysis for assessment of land suitability for agricultural use. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2020, vol. 50, no. 6, pp. 93–105. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-6-11>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многокритериальный анализ решений (МКАР) объединяет несколько методов (например, метод простого аддитивного взвешивания (SAW) [1], метод TOPSIS [2], семейство методов ELECTRE [3], метод анализа иерархий (МАИ) [4]), с помощью которых представляется возможным с некоторой

долей вероятности оценить множество критериев для принятия решений. МКАР применяется в качестве инструмента в сложных ситуациях, возникающих при наличии большого количества критериев, взаимодействующих между собой, в том числе в нечетких областях [5, 6]. Для подобных проблем чаще всего не существует единственно верного решения, поэтому необходимо использова-

ние предпочтений лица, его принимающего. В настоящее время разработано большое количество автоматизированных подходов поддержки принятия решений, применяемых во многих дисциплинах, в том числе и в сельском хозяйстве¹ [7–10]. Некоторые из них реализованы как самостоятельное специализированное программное обеспечение, другие интегрированы с геоинформационными системами (ГИС) [8, 11–15].

Необходимость разработки автоматизированной системы оценки пригодности сельскохозяйственных земель для возделывания различных культур обосновывается тем, что в настоящее время для производителей все сложнее выбрать соответствующую информацию, необходимую для решения их повседневных проблем, и адаптировать ее для более эффективного управления своими хозяйствами. В связи с этим в мировой практике все большее внимание уделяется цифровым технологиям с использованием различных методов интеллектуального анализа для поддержки принятия решений. В то же время производители должны систематически переосмысливать свои информационные требования и взвешивать затраты, ценности и альтернативные источники информации.

Цель исследования – обосновать целесообразность применения методов многокритериального анализа решений, интегрированных с ГИС, для автоматизации процесса оценки пригодности земель.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на территории ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области (54°56'24" с.ш., 82°06'12" в.д.), расположенного в лесостепной зоне. Для создания геоинформационной модели землепользования хозяйства, включающего 27 рабочих (земельных) участков общей площадью 3131 га, использовали картографические материалы ранних лет

издания, включающие почвенную (1984 г., М 1 : 25 000) и топографическую (2001 г., М 1 : 50 000) карты, цифровые модели рельефа (SRTM), космические снимки сверхвысокого разрешения (Google карты).

Пространственные данные включали информацию о почвах и рельефе местности. Основным источником информации о почвенном покрове являлись почвенные карты хозяйства, имеющиеся на бумажном носителе. Поскольку при изготовлении крупномасштабные почвенные карты часто не имели точной геодезической привязки, в процессе привязки растрового изображения к системе координат в QGIS возникли несоответствия размещения объектов на почвенной карте и реальной местности (ошибки достигали 300 м и более). Данная проблема решена посредством уточнения почвенной карты методом сравнения характерных объектов на карте (дороги, лесополосы, контуры солоды) и космических снимков. С помощью инструментов векторизации на основе карт землепользования хозяйства в геоинформационную базу (карта QGIS, включающая атрибутивную базу) нанесены границы рабочих участков и определена их площадь. На основе используемых почвенных карт определены границы элементарных почвенных ареалов (ЭПА) рабочих участков. В атрибутивную базу данных ГИС по каждому ЭПА занесены их площади, типы почв, мощность гумусового слоя, гранулометрический состав, степень эродированности. Единый коэффициент, характеризующий каждый рабочий участок по перечисленным выше параметрам, вычислен как среднее значение по участку исходя из отношения площади ЭПА к общей площади рабочего участка.

Балл контурности рабочих участков оценен по методике, предложенной в работе [16], степень контрастности почв – по Ю.К. Юодису [17]. Распаханность рассчитывали как процентное отношение площади необрабатываемых земель (колки, солонцы

¹Ткаченко В.В. Предпосылки создания системы моделей и методики многокритериальной оценки и выбора технологий возделывания сельскохозяйственных культур // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар: Кубанский ГАУ. 2015. № 9 (113). С. 1680–1693. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/119.pdf>

и др.) внутри рабочего участка к его общей площади. Степень дренированности определяли исходя из условий залегания почв в рельефе: рабочие участки, имеющие наклон рельефа около 1 град. и меньше, отнесены к слабодренированным территориям, участки с уклоном 1–3 град. – к дренированным.

Для вычисления морфометрических показателей рельефа использованы данные SRTM, распространяемые Геологической службой США на свободной основе. Два снимка SRTM были загружены в Quantum-GIS (QGIS) в виде растровых слоев и обрезаны по границам рабочих участков. При помощи инструмента анализа QGIS «Морфометрический анализ» → «Крутизна» вычислен уклон рельефа в виде растрового изображения. Для дальнейшего использования полученный растровый слой преобразован в векторный с помощью инструмента «Vector-raster» → «Rastervaluestopoints (randomly)». Экспозиция склонов определена с помощью инструмента анализа QGIS «Экспозиция».

В качестве инструмента оценки пригодности земель использовали метод ELECTRE TRI

(ELimitation Et Choix Traduisant la REalité), входящий в состав группы МКАР ELECTRE, предложенный в середине 1960-х годов Б. Руа. Суть метода состоит в использовании при расчетах более чувствительных показателей сравнимости – индексов согласия и несогласия. В настоящее время используется целое семейство этого метода [3, 18–20]. Для определения весов критериев использовали плагин Easy AHP (Analytic Hierarchy Process), для получения карты пригодности земель – плагин ELECTRE TRI для QGIS [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс получения карты пригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур можно представить в виде схемы (см. рис. 1).

Оценку пригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур проводили по следующим природным критериям: дренированности, гранулометрическому составу почв, контрастности почвенного покрова, контурности рабочих участков, мощ-

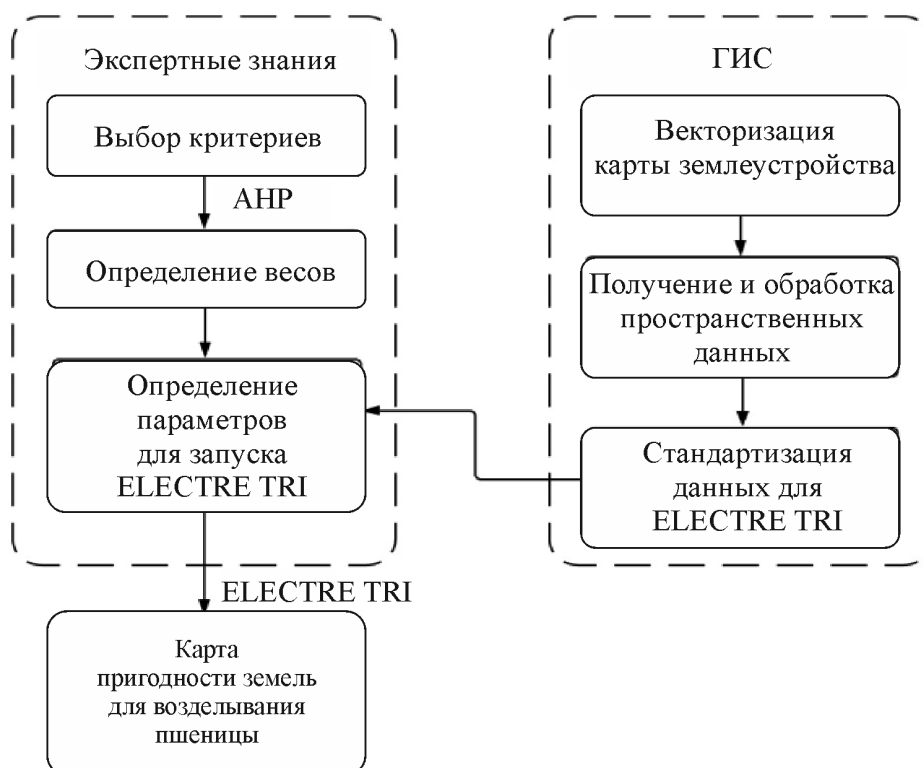


Рис. 1. Схема процесса получения карт пригодности земель

Fig. 1. Scheme of the process of obtaining land suitability maps

ности гумусового слоя, распаханности, углу уклона рельефа, экспозиции склонов, эродированности. Критерии выбраны экспертным путем, набор критериев не является исчерпывающим и может меняться в соответствии с решаемой задачей. Выделенным критериям экспертно (участвовали 6 экспертов) придавали определенные веса, так как каждый критерий имеет различную степень важности применительно к данной предметной области.

Классическим методом для определения весов критериев является МАИ (разработан Т. Саати [4]). Суть метода состоит в следующем. Пусть имеем n критериев, для каждого из которых требуется определить вес. Сначала строится матрица парных сравнений вида

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

где элементы над главной диагональю a_{ij} определяют путем сравнения критериев, а именно: насколько критерий i важнее критерия j . Степень важности оценивают числом из диапазона $[1, 9]$, 1 ставят, если критерии равно важные, 9 – если критерий i абсолютно превосходит критерий j . Чтобы веса критериев, найденные по МАИ, были корректными, построенная матрица парных сравнений должна быть согласована [4]. Для проверки согласованности достаточно вычислить отношение согласованности (ОС, англ. CR), которое находится по формуле

$$\text{ОС} = \text{ИС}/\text{СИ},$$

где $\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ – индекс согласован-

ности (англ. CI), n – размерность матрицы, $\lambda_{\max}$ – наибольшее собственное значение матрицы, СИ – случайный индекс [4], значения которого вычислены для матриц разных размерностей (см. табл. 1).

Матрицу можно считать согласованной, если значение ОС меньше или равно 0,10. Веса критериев находятся как координаты орта произвольного собственного вектора матрицы A , соответствующего собственному числу $\lambda_{\max}$. Для выделенных критериев построена матрица парных сравнений, что позволило запустить процедуру Easy ANP (см. рис. 2) и вычислить веса критериев (см. рис. 3).

Обычно выделяют следующие задачи МКАР: выбор, сортировку и ранжирование. МАИ можно отнести к задаче ранжирования, ELECTRE TRI – к задаче сортировки в следующей постановке: отнести альтернативы (в нашем случае – рабочие участки) к определенной категории (некоторый класс земель). Согласно методике классификации земель FAO², рабочие участки могут быть отнесены к следующим классам земель: S1 – наиболее пригодные, S2 – среднепригодные, S3 – малопригодные, N – непригодные. Альтернативы относятся к определенной категории с помощью сравнения значений критериев рассматриваемой альтернативы с профилями, которые определяют границы категорий. Строится отношение превосходства, которое характеризует, как альтернатива сравнивается с границами категорий. Это отношение строится на основе индексов частичной согласованности, глобальных индексов согласованности, индексов частичной несогласованности, нечетких отношений согласованности, связанных с индексами на-

Табл. 1. Значения индексов СИ

Table 1. Random indices (RI) values

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
СИ	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

²FAO. A framework for land evaluation. Publication Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1976. URL: <http://www.fao.org/3/x5310e/x5310e00.htm>

STEP 2: Fill The Pairwise Matrix

	дренированность	гумусовый	гранулометрический	угол уклона
Эродированность	1	1.1	1.3	1.5
Мощность гумусового слоя	0.909	1	1.2	1.3
Гранулометрический состав	0.769	0.833	1	1.2
Угол уклона	0.667	0.769	0.833	1
Экспозиция склонов	0.5	0.667	0.667	0.83
Контрастность	0.455	0.5	0.5	0.66
Распаханность	0.333	0.333	0.333	0.5
Дренажность	0.2	0.25	0.25	0.33
Контурность	0.111	0.125	0.143	0.16

AHP Indicators

$\lambda = 9.041$

$CI = 0.005$

$CR = 0.003$

Calculate

Load table...

Save table...

Back Next Cancel

Рис. 2. Матрица парных сравнений

Fig. 2. The pairwise comparison matrix

STEP 3: Weighted Linear Combination (WLC)

Output: Browse...

	Layer Name	Weight
1	Эродированно...	0.2
2	Мощность гум...	0.177
3	Гранулометри...	0.163
4	Угол уклона	0.131
5	Экспозиция ск...	0.113
6	Контрастность	0.095
7	Распаханность	0.061
8	Дренажно...	0.039
9	Контурность	0.022

Back Run Exit

Рис. 3. Веса критериев

Fig. 3. Criteria weights

дежности и уровнем срезки λ (λ -cutting level) [21]. «Нечеткость» здесь возникает в связи с вводом порогов предпочтения и безразличия, которые мы определим ниже.

Пусть $g_1, \dots, g_m$ – набор критериев, $C_1, \dots, C_{p+1}$ – категории, $b_0, \dots, b_{p+1}$ – профили (границы категорий), т.е. b_h – верхняя граница категории C_h и нижняя граница категории C_{h+1} (см. рис. 4).

Введем выражение $a \succ b_h$, которое обозначает отношение превосходства, т.е. альтернатива a , по крайней мере, так же хороша, как b_h . Для j -го критерия пороги предпочтения, безразличия и вето определяют следующим образом для каждого критерия:

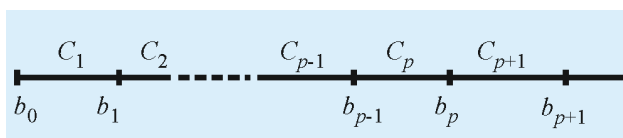


Рис. 4. Схематическое изображение категорий и их профилей

Fig. 4. Schematic illustration of categories and their profiles

– порог безразличия – наибольшая разница между значениями альтернативы a и ближайшей левой границей профиля b_h , при которой сохраняется безразличие между альтернативой a и b_h , т.е. эту разницу можно считать незначительной;

– порог предпочтения – наименьшая разница между значениями альтернативы a и ближайшей левой границей профиля b_h , при которой $a \succ b_h$;

– порог вето – наименьшая разница между b_h и a , несовместимая с утверждением $a \succ b_h$.

Уровень срезки λ : выбирается из диапазона $(0,5; 1,0)$, указывает долю критериев, для которой выполнены необходимые условия для того, чтобы назначить альтернативу определенной категории. Например, если $\lambda = 0,75$, то $3/4$ альтернатив должны соответствовать правилам, определяющим категорию. Как показывает опыт, наилучшие результаты получаются при значении $\lambda = 0,7$.

fields :: Features Total: 27, Filtered: 27, Selected: 0													
123 id	id	area	humus	mechanical	erosion	slope	exposition	soil struc	contouring	contrast	drainage	plowing	
1	1	156,33231	1,000	3,000	0,000	2,000	1,000	0,003	94,000	0,166	2,000	4,600	
2	2	122,48100	1,000	3,000	0,000	3,000	1,000	0,000	87,000	0,000	2,000	19,000	
3	3	235,80878	1,380	2,580	0,000	2,000	2,000	0,011	91,000	2,320	2,000	8,000	
4	4	60,68150	1,030	3,000	0,000	1,000	3,000	0,070	95,000	1,260	1,000	0,000	
5	5	109,84252	1,430	3,000	0,000	1,000	3,000	0,011	95,000	1,860	1,000	0,000	
6	6	61,13786	1,680	2,680	0,000	1,000	2,000	0,029	96,000	0,340	1,000	0,000	
7	7	305,51932	1,770	2,960	0,030	2,000	3,000	0,028	94,000	0,830	2,000	6,400	
8	8	410,98341	1,840	2,960	0,000	2,000	2,000	0,024	96,000	5,350	2,000	2,700	
9	9	116,29625	2,000	3,000	0,000	1,000	3,000	0,007	96,000	1,520	1,000	0,000	
10	10	82,52932	1,620	2,550	0,000	2,000	3,000	0,042	96,000	1,360	2,000	0,000	
11	11	101,55491	1,950	2,900	0,000	2,000	3,000	0,017	97,000	1,700	2,000	0,000	
12	12	289,45642	1,760	2,910	0,000	1,000	2,000	0,016	98,000	1,090	2,000	0,200	
13	13	47,28170	1,320	2,830	0,100	1,000	2,000	0,400	93,000	2,630	1,000	0,000	
14	14	29,16201	1,510	3,000	0,000	2,000	2,000	0,083	87,000	1,180	2,000	0,000	
15	15	101,18546	1,620	2,460	0,000	2,000	2,000	0,047	95,000	1,800	2,000	5,500	
16	16	53,02088	1,200	3,000	0,200	1,000	4,000	0,026	94,000	1,020	2,000	0,000	
17	17	18,68099	1,630	3,000	0,020	1,000	4,000	0,033	89,000	2,110	1,000	0,000	
18	18	63,94585	2,000	3,000	0,000	1,000	4,000	0,000	95,000	0,000	2,000	0,000	
19	19	42,54306	1,930	3,000	0,020	1,000	4,000	0,062	93,000	0,340	2,000	0,000	
20	20	11,98816	1,700	3,000	0,000	2,000	4,000	0,218	82,000	1,440	2,000	3,300	
21	21	35,94620	1,750	3,000	0,910	1,000	2,000	0,054	90,000	0,890	2,000	0,000	
22	22	1,75000	2,650	2,650	1,000	1,000	3,000	0,010	97,000	1,450	1,000	0,000	
23	23	192,90356	1,790	3,000	0,000	2,000	2,000	0,005	97,000	1,000	2,000	0,000	
24	24	37,50123	1,600	3,000	0,290	2,000	2,000	0,051	89,000	1,440	2,000	0,000	
25	25	54,00764	1,390	3,000	0,000	1,000	2,000	0,021	93,000	0,000	1,000	0,000	
26	26	69,55141	2,000	3,000	0,000	2,000	2,000	0,000	95,000	0,000	1,000	0,000	
27	27	163,19167	1,880	3,000	1,000	2,000	3,000	0,004	96,000	0,000	1,000	2,000	

Рис. 5. Атрибутивная база данных

Fig. 5. Attributive database

Для запуска процедуры ELECTRE TRI подготовлены атрибутивная база данных по всем критериям для выделенных рабочих участков (см. рис. 5), веса критериев (результат процедуры АНР, см. рис. 3). Определяем профили (классы земель согласно FAO), пороги предпочтения, безразличия и вето, а также уровень срезки λ (см. рис. 6).

При пессимистическом сценарии альтернатива a сравнивается с профилями b_i , где $i = p, p-1, \dots, 0$. Если b_h – первый профиль, при котором $a > b_h$, то a относят к категории C_{h+1} . При оптимистическом сценарии альтернатива a сравнивается с профилями b_i , где $i = 1, 2, \dots, p+1$. Если b_h – первый профиль, при котором $b_h > a$, то a относят к категории C_h . Когда оценки альтернативы находятся между двумя профилями категории по каждому критерию, то оба сценария относят альтернативу этой категории. Расхождение существует между результатами двух сценариев, когда альтернатива несравнима с одним или несколькими профилями. В таком случае пессимистический сценарий относит альтернативу к более низкой категории, чем оптимистический.

Результатом процедуры являются две карты решений по пессимистическому и оптимистическому сценариям.

При заполнении всех необходимых данных в плагин ELECTRE TRI становится доступным процесс генерации карт решений по пессимистическому (см. рис. 7) и опти-

мистическому (см. рис. 8) сценариям. Результаты анализа представлены в табл. 2.

При пессимистическом сценарии 7% земель от общей территории ЗАО «Мирный» отнесено к наиболее пригодным, 69 – к среднепригодным, 24% – к малопригодным. При оптимистическом сценарии 43% отнесены к наиболее пригодным, 57% – к среднепригодным.

Для сравнения полученных результатов проведен анализ пригодности земель методом взвешенной линейной комбинации или, как его еще называют, методом простого аддитивного взвешивания (SAW). Для этого метода использовали веса критериев, которые определены с помощью процедуры МАИ, атрибутивная база данных (см. рис. 5) нормализована к шкале [0; 1]. Для каждого рабочего участка получен индекс пригодности земли (это и есть взвешенная линейная комбинация), на основании которого каждый участок отнесен к определенному классу пригодности (см. табл. 3). Оказалось, что из 27 участков для 23 класс пригодности совпал с установленным по оптимистическому сценарию (при этом для четырех несовпавших погрешность была минимальной). Для более половины участков результат отличается от полученного по пессимистическому сценарию. Отсюда можно сделать вывод, что оптимистический сценарий показывает более точный результат.

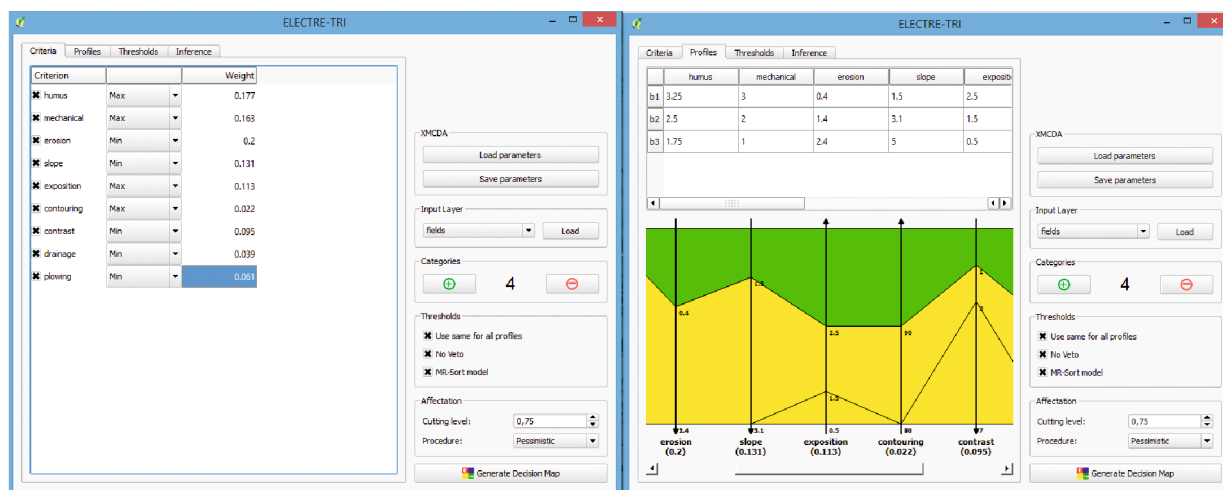


Рис. 6. Окно плагина ELECTRE TRI в QGIS: веса, профили

Fig. 6. ELECTRE TRI plugin window in QGIS: weights, profiles

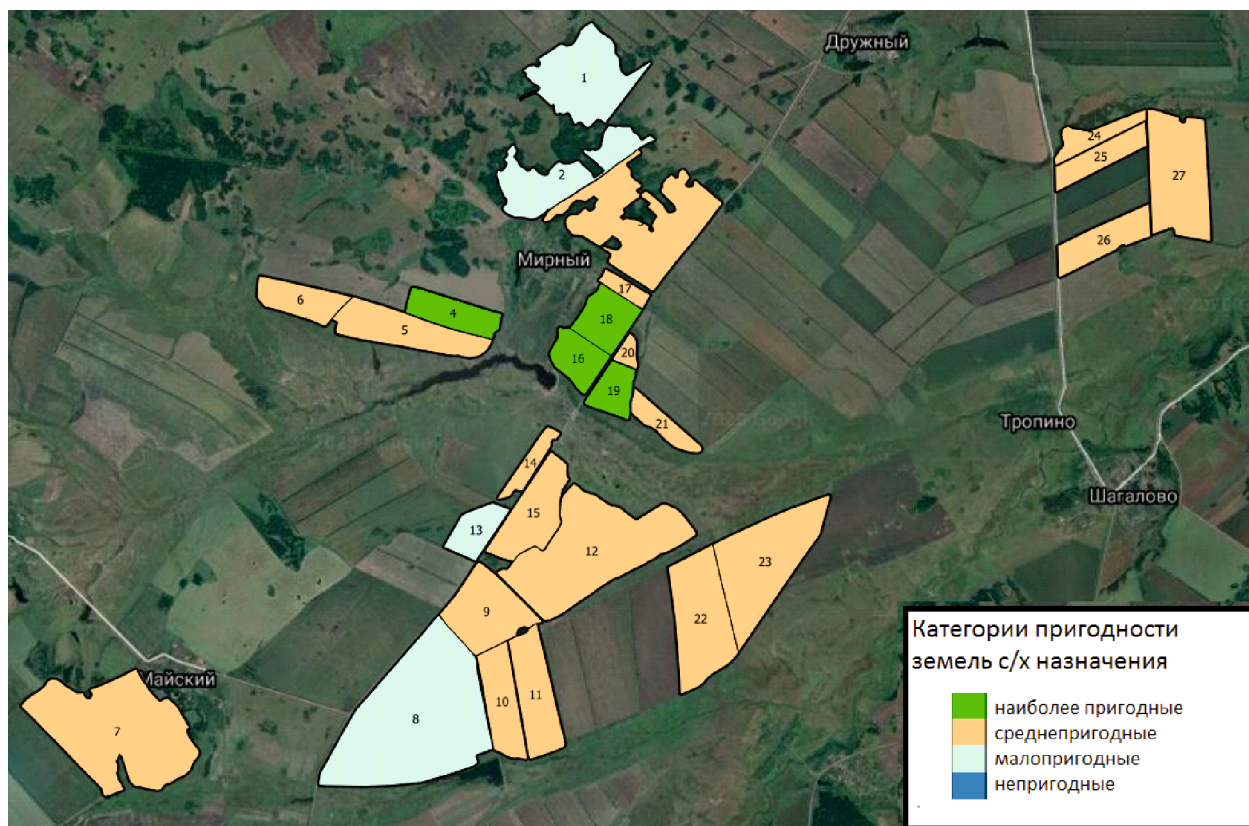


Рис. 7. Карта пригодности земель. Пессимистический сценарий

Fig. 7. Map of land suitability. Pessimistic scenario

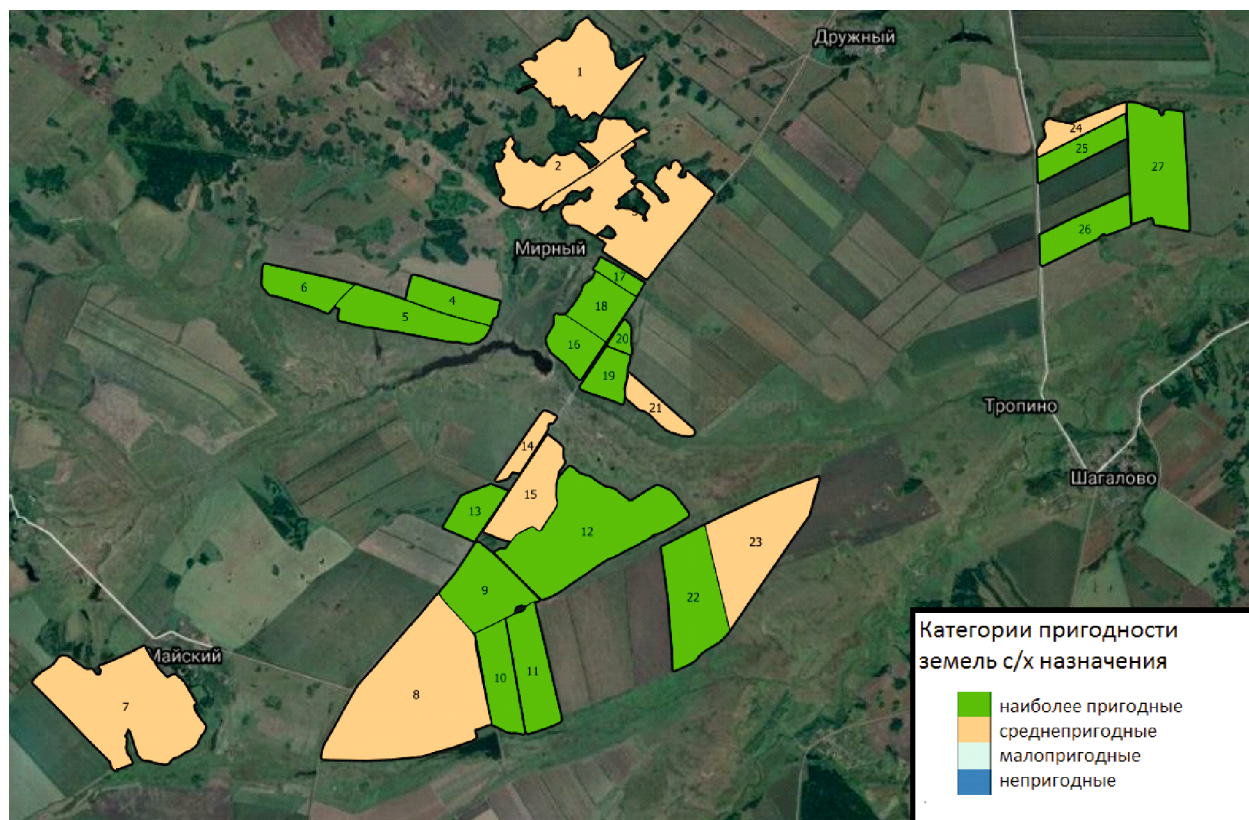


Рис. 8. Карта пригодности земель. Оптимистический сценарий

Fig. 8. Map of land suitability. Optimistic scenario

Табл. 2. Итоговая таблица оценки пригодности земель

Table 2. Final table of the land suitability assessment

Категория пригодности земель	Пессимистический сценарий			Оптимистический сценарий		
	Число участков	Площадь	Процент от общей площади	Число участков	Площадь	Процент от общей площади
Наиболее пригодные	4	220	7	16	1346	43
Среднепригодные	19	2174	69	11	1785	57
Малопригодные	4	737	24	0	0	0
Непригодные	0	0	0	0	0	0

Табл. 3. Результаты анализа пригодности земель методом аддитивного взвешивания

Table 3. Results of the analysis of lands suitability by the method of additive weighting

id	SAW	Оптимистический сценарий	Пессимистический сценарий
1	S2	S2	S3
2	S3	S2	S3
3	S2	S2	S2
4	S1	S1	S1
5	S1	S1	S2
6	S1	S1	S2
7	S1	S2	S2
8	S2	S2	S3
9	S1	S1	S2
10	S2	S1	S2
11	S1	S1	S2
12	S1	S1	S2
13	S2	S1	S3
14	S2	S2	S2
15	S2	S2	S2
16	S1	S1	S1
17	S1	S1	S2
18	S1	S1	S1
19	S1	S1	S1
20	S1	S1	S2
21	S2	S2	S2
22	S1	S1	S2
23	S2	S2	S2
24	S2	S2	S2
25	S1	S1	S2
26	S1	S1	S2
27	S1	S1	S2

В процедурах МАИ и ELECTRE TRI есть вероятность погрешности результатов в силу того, что методы используют экспертные знания и эвристики. В МАИ это происходит при составлении матрицы парных сравнений. Однако согласованность матрицы можно достичь путем корректировки сравнений и отслеживанием выводимых на экран значений индикаторов процедуры, нужные диапазоны для которых известны. В ELECTRE TRI на основании экспертного мнения определяются пороги предпочтения, безразличия и вето, а также уровень срезки λ . Результат процедуры – две карты пригодности земель по оптимистическому и пессимистическому сценарию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целесообразность применения методов многокритериального анализа решений, интегрированных с ГИС, для автоматизации процесса оценки земель для возделывания сельскохозяйственных культур, не вызывает сомнения. Интеграция ГИС и МКАР – оптимальная платформа для разработки пространственных систем поддержки принятия решений. Данное исследование по оценке пригодности земель продемонстрировало перспективность применения МКАР и ГИС для выполнения подобных работ. Кроме того, интеграция с QGIS дает возможность реализовывать все ее вычислительные мощности, что позволяет использовать различные форматы и способы обработки первичных данных. Этот факт является главным отличием данной системы от веб-систем подобного направления, где функционал ГИС сильно ограничен.

Пространственные системы поддержки принятия решений, базирующиеся на интеграции ELECTRE TRI и QGIS, охватывают весь процесс оценки пригодности земель: сбор, обработку и анализ пространственных данных, экспертную оценку критериев (плагин Easy АНР), реализацию многокритериального анализа решений, формирование и визуализацию выходных данных.

В дополнение к используемым методам с целью уточнения, какой из сценариев – пессимистический или оптимистический – имеет большую согласованность с природными условиями хозяйства, т.е. относит альтернативу к наиболее близкой категории пригодности, проведен анализ методом взвешенной линейной комбинации (SAW). По результатам SAW, 85% рабочих участков получили ту же категорию пригодности, что и при генерации карты по оптимистическому сценарию. Совпадения с пессимистическим сценарием составило 44%. Можно сделать вывод, что реализация оптимистического сценария более близко отражает качественные характеристики рабочих участков.

Основные проблемы выполнения данного исследования связаны со сложностью получения пространственных данных по выбранным параметрам, процессом их цифровизации и стандартизации. Эта проблема может быть решена путем внесения изменений в перечень критериев, информация по которым доступна в глобальных базах данных (например, Google Earth Engine). Опыт зарубежных исследований показывает, что для выполнения работ подобного рода более целесообразно применять именно такие данные.

Следует также отметить, что ELECTRE TRI и МАИ подразумевают формализацию экспертных знаний. В связи с этим возможны проблемы, связанные с их качеством, например, выбор критериев может недостаточно полно (точно) характеризовать требования культур и их некорректное ранжирование. Однако даже с учетом имеющихся проблем интеграция ГИС и МКАР имеет большие перспективы по автоматизации процессов оценки пригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Muslihudin M., Susanti T.S., Maselena A.* The priority of rural road development using fuzzy logic based simple additive weighting // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 118. N 8. P. 9–16. DOI: 2018-118-7-9/articles/8/2.pdf.
2. *Wang Y.M., Elhag T.M.S.* Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment // *Expert systems with applications*. 2006. Vol. 31. N 2. P. 309–319. DOI: 10.1016 / j.eswa.2005.09.040.
3. *Figueira J.R., Greco S., Roy B., Słowiński R.* ELECTRE methods: main features and recent developments // *Handbook of multicriteria analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 51–89. DOI: 10.1007/978-3-540-92828-7_3.
4. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий: монография, М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
5. *Осипов В.П., Судаков В.А.* Многокритериальный анализ решений при нечетких областях предпочтений // *Препринты Института прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша*. 2017. № 6. С. 6–16. DOI: 10.20948/prepr-2017-6.
6. *Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н.* Принятие решений в условиях неопределенности: монография. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 283 с.
7. *Куликова М.А., Ломазов В.А., Оганова И.Б., Петросов Д.А., Ступаков А.Г.* Многокритериальная оценка и выбор земельных ресурсов агробизнес-проектов // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2013. № 7. С. 36–38.
8. *Яцало Б.И., Диденко В.И., Грицюк С.В., Мирзеабасов О.А., Пичугина И.А.* Управление землепользованием с применением многокритериальной системы поддержки принятия решений Decerns // *Вестник РАЕН*. 2013. № 2. С. 66–74.
9. *Бутовец Е.С.* Многокритериальная оценка сортов сои на заключительном этапе селекции // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2015. № 2 (34). С. 13–16.
10. *Алабушев А.В., Романюкин А.Е., Ковтунова Н.А., Шишова Е.А., Ковтунов В.В.* Использование многокритериальной оценки в селекции сорго сахарного // *Земледелие*. 2019. № 2. С. 39–41. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10211.

11. Kumar T., Jhariya D.C. Land quality index assessment for agricultural purpose using multi-criteria decision analysis (MCDA) // *Geocarto International*. 2015. Vol. 30. N 7. P. 822–841. DOI: 10.1080/10106049.2014.997304.
12. Диденко В.И., Яцало Б.И., Грицюк С.В., Мирзеабасов О.А., Пичугина И.А. Управление территориями на основе анализа рисков с использованием многокритериальной ГИС поддержки принятия решений // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2013. № 2. С. 143–152.
13. Chen Y., Yu J., Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation // *Environmental modelling & software*. 2010. Vol. 25. N 12. P. 1582–1591. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.06.001.
14. Mishra A.K., Deep S., Choudhary A. Identification of suitable sites for organic farming using AHP & GIS // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2015. Vol. 18. N 2. P. 181–193. DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.06.005.
15. Yalew S.G., Van Griensven A., van der Zaag P. AgriSuit: A web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 128. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.compag.2016.08.008.
16. Рудю В.А., Махт В.А. Оценка технологических свойств земли. Омск: Западно-Сибирское книжное издательство, 1976. 118 с.
17. Юодис Ю.К. О структуре почвенного покрова Литовской ССР // *Почвоведение*. 1967. № 11. С. 50–55.
18. Corrente S., Greco S., Słowiński R. Multiple criteria hierarchy process for ELECTRE Tri methods // *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 252. N 1. P. 191–203. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.053.
19. Mendas A., Delali A. Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012. Vol. 83. P. 117–126. DOI: 10.1016/j.compag.2012.02.003.
20. Mendas A., Delali A., Khalfallah M., Likou L., Gacemi M.A., Boukrentach H., Djilali A., Mahmoudi R. Improvement of land suitability assessment for agriculture – application in Algeria // *Arabian Journal of Geosciences*. 2014. Vol. 7. N 2. P. 435–445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0860-2>
21. Sobrie O., Pirlot M. Implementation of ELECTRE TRI in an Open Source GIS // *European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding»*. Newsletter. 2012. Series 3, 26, P. 15–18. http://olivier.sobrie.be/papers/ewg_2012_sobrie_pirlot.pdf.

REFERENCES

1. Muslihudin M., Susanti T.S., Maseleno A. The priority of rural road development using fuzzy logic based simple additive weighting. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, vol. 118, no. 8, pp. 9–16. DOI: 2018-118-7-9/articles/8/2.pdf.
2. Wang Y.M., Elhag T.M.S. Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment. *Expert systems with applications*, 2006, vol. 31, no. 2, pp. 309–319. DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.040.
3. Figueira J.R., Greco S., Roy B., Słowiński R. ELECTRE methods: main features and recent developments. *Handbook of multicriteria analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 51–89. DOI: 10.1007/978-3-540-92828-7_3.
4. Saati T. Decision making. *Analytic hierarchy process*. M.: Radio i svyaz' = Radio and Communications, 1993, 278 p. (In Russian).
5. Osipov V.P., Sudakov V.A. Multi-criteria decision analysis with fuzzy preference areas. *Preprinty Instituta prikladnoj matematiki RAN im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints of Applied Mathematics RAS*, 2017, no. 6, pp. 6–16. (In Russian). DOI: 10.20948/prepr-2017-6.
6. Demidova L.A., Kirakovskij V.V., Pyl'kin A.N. *Decision making under conditions of uncertainty*. M.: Goryachaya liniya-Telekom = Hotline-Telecom, 2015, 283 p. (In Russian).
7. Kulikova M.A., Lomazov V.A., Oganova I.B., Petrosov D.A., Stupakov A.G. Multi-criteria assessment and selection of land resources for agribusiness projects. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*, 2013, no. 7, pp. 36–38. (In Russian).
8. Yacalo B.I., Didenko V.I., Gricyuk S.V., Mirzeabasov O.A., Pichugina I.A. Land use management with implementation of multi-criteria decision support system Decerns. *Vestnik RAEN = Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2013, no. 2, pp. 66–74. (In Russian).
9. Butovec E.S. Multicriteria evaluation of soybean varieties on the final selection stage. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik = Far East Agrarian Bulletin*, 2015, no. 2 (34), pp. 13–16. (In Russian).

10. Alabushev A.V., Romanyukin A.E., Kovtunova, N.A., Shishova, E.A., Kovtunov V.V. The use of multi-criteria estimation in sweet sorghum breeding. *Zemledelie*, 2019, no. 2, pp. 39–41. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10211. (In Russian).
11. Kumar T., Jhariya D.C. Land quality index assessment for agricultural purpose using multi-criteria decision analysis (MCDA). *Geocarto International*, 2015, vol. 30, no. 7, pp. 822–841. (In Russian). DOI: 10.1080/10106049.2014.997304.
12. Didenko V.I., YAcalo B.I., Gricyuk S.V., Mirzeabasov O.A., Pichugina I.A. Environmental risk management with the use of multi-criteria GIS for decision-making support. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2013, no. 2, pp. 143–152. (In Russian).
13. Chen Y., Yu J., Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental modelling & software*, 2010, vol. 25, no. 12, pp. 1582–1591. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.06.001.
14. Mishra A.K., Deep S., Choudhary A. Identification of suitable sites for organic farming using AHP & GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 181–193. DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.06.005.
15. Yalew S.G., Van Griensven A., van der Zaag P. AgriSuit: A web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, vol. 128, pp. 1–8. DOI: 10.1016 / j.compag.2016.08.008.
16. Rudi V.A., Maht V.A. *Assessment of technological properties of the earth*. Omsk: Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo = West Siberian Book Publishing House, 1976, 118 p. (In Russian).
17. Yuodis YU.K. On the structure of the soil cover of the Lithuanian SSR. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1967, no. 11, pp. 50–55. (In Russian).
18. Corrente S., Greco S., Słowiński R. Multiple criteria hierarchy process for ELECTRE Tri methods. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 252, no. 1, pp. 191–203. DOI: 10.1016 / j.ejor.2015.12.053.
19. Mendas A., Delali A. Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, vol. 83, pp. 117–126. DOI: 10.1016 / j.compag.2012.02.003.
20. Mendas A., Delali A., Khalfallah M., Likou L., Gacemi M.A., Boukrentach H., Djilali A., Mahmoudi R. Improvement of land suitability assessment for agriculture – application in Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 435–445. DOI: 10.1007/s12517-013-0860-2.
21. Sobrie O., Pirlot M. Implementation of ELECTRE TRI in an Open Source GIS. *European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding»*. Newsletter. 2012, Series 3, vol. 26, P. 15–18. DOI: olivier.sobrie.be/papers/ewg_2012_sobrie_pirlot.pdf.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Каличкин В.К.**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: kvk@ngs.ru

Логачёва О.М., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; e-mail: omboldovskaya@mail.ru

Сигитов А.А., младший научный сотрудник; e-mail: sigit1995@mail.ru

Гарафутдинова Л.В., младший научный сотрудник; e-mail: lv.garafutdinova@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

✉ **Vladimir K. Kalichkin**, Doctor of Science in Agriculture, Professor, Head Researcher; address: PO Box 463, SFSCARAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: yura011@yandex.ru, e-mail: kvk@ngs.ru

Olga M. Logachova, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Senior Researcher; e-mail: omboldovskaya@mail.ru

Alexandr A. Sigitov, Junior Researcher; e-mail: sigit1995@mail.ru

Ludmila V. Garafutdinova, Junior Researcher; e-mail: lv.garafutdinova@mail.ru

Дата поступления статьи 10.08.2020
Received by the editors 10.08.2020