



DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-337-346

EDN: MWYWHM

УДК 504.054

Научная статья / Research article

Оценка влияния автомобильного транспорта на экологическое состояние урбанизированных территорий через индекс загрязнения

С.А. Новикова^{1,2}, С.М. Угай²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск,
Российская Федерация

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск,
Российская Федерация
eco-science@mail.ru

Аннотация. Предложен новый способ расчета индекса загрязнения урбанизированных территорий от автотранспортных средств на основе трех параметров (загрязнение атмосферного воздуха, уровень шума, загрязнение почвы) и определены веса каждого параметра в нем. Разработан первичная покомпонентная оценка всех рассматриваемых показателей и последующий расчет индекса загрязнения для городов Иркутской агломерации. Предложен научно обоснованный подход к разработке приоритетных направлений природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, метод анализа иерархий, индекс загрязнения урбанизированных территорий

Вклад авторов. Новикова С.А. – концептуализация исследования, разработка методологических основ по расчету индекса загрязнения урбанизированных территорий автотранспортом, визуализация и интерпретация полученных результатов; Угай С.М. – концептуализация исследования, критический анализ текста.

История статьи: поступила в редакцию 23.02.2024; доработана после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 12.06.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Новикова С.А., Угай С.М. Оценка влияния автомобильного транспорта на экологическое состояние урбанизированных территорий через индекс загрязнения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 337–346. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-337-346>

Assessment of the impact of motor transport on the ecological state of urbanized areas using the pollution index

Svetlana A. Novikova^{1,2}, Sergey M. Ugay²

¹*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*

²*Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russian Federation*

eco-science@mail.ru

Abstract. A new method for calculating the pollution index of urbanized areas from motor vehicles is proposed based on three parameters (air pollution, noise level, soil pollution) and the weights of each parameter in it are determined. A primary component-by-component assessment of all the indicators under consideration and subsequent calculation of the pollution index for the cities of the Irkutsk agglomeration are carried out. A scientifically based approach to the development of priority areas of environmental protection measures is proposed.

Keywords: automobile transport, urban areas, hierarchy process analysis, pollution index

Authors' contribution. Novikova S.A. – conceptualization of the study, development of methodological foundations for calculating the index of pollution of urbanized areas by motor vehicles, visualization and interpretation of the obtained results; Ugai S.M. – conceptualization of the study, critical analysis of the text.

Article history: received 23.02.2024; revised 21.05.2024; accepted 12.06.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Novikova SA, Ugay SM. Assessment of the impact of motor transport on the ecological state of urbanized areas using the pollution index. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):337–346. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-337-346>

Введение

Автотранспорт оказывает существенное влияние на состояние окружающей среды и, как следствие, здоровье населения урбанизированных территорий [1]. Так, в селитебных зонах создаются высокие уровни шума и загрязнения воздушного бассейна, происходит деградация почв и растительности придорожных полос. В связи с этим важно объективно оценивать экологическое состояние городской среды с точки зрения загрязнения от автомобильного транспорта.

В настоящее время существуют показатели оценки состояния отдельных компонентов окружающей среды, такие как индекс загрязнения атмосферы, суммарный показатель загрязнения почвы, индекс шумового загрязнения, однако индекса, который объединял бы эти три показателя, нет, хотя его наличие позволяло бы решать следующие задачи: оценивать загрязнение территории автотранспортом комплексно и разрабатывать приоритетные направления природоохранных мероприятия исходя из оценки наиболее уязвимых компонентов окружающей среды. Сложность разработки подобных индексов заключается в отсутствии необходимого массива данных для проверки объективности приоритетов одних параметров над другими.

Ранее были предприняты попытки рассчитать интегральный экологический показатель состояния городской среды. Так, в [2] индекс загрязнения был определен как сумма отношений полученных результатов к установленным предельно допустимым концентрациям (ПДК) или фоновым значениям исследуемых параметров среды: атмосферного воздуха, почвы и растительности. Следует отметить, что в данном подходе стандарты качества установлены лишь для ограниченного перечня загрязняющих веществ, а фоновые значения законодательно не закреплены.

Учеными [3] предложен индекс техносферной совместимости, учитывающий социально-экономические показатели и позволяющий применять искусственные нейросети для прогнозирования рисков. Авторами [4] разработана методика оценки уровня экологической безопасности природной воды из различных источников водоснабжения и проведено их ранжирование на основе интегрального индекса техногенного загрязнения.

Все вышеперечисленные работы не решают поставленных ранее задач. Наиболее подходящим для решения такой проблемы авторы данного исследования считают использование метода анализа иерархий (МАИ) (метода Т.Л. Саати) [5], который, несмотря на субъективность подхода, позволяет успешно решать подобные задачи. Так, использование МАИ помогло автору [6] выявить расположение зон возможного залегания подземных вод, что послужило предпосылкой для разработки комплекса мероприятий по рациональному использованию водных ресурсов. Учеными [7] выполнен анализ биопозитивности различных типов дорожного покрытия и сделан выбор в пользу асфальтобетонного. В [8] с помощью метода Т.Л. Саати выявлены приоритетные сценарии развития аварийных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса.

Авторами [9] определены показатели и оценена экологическая составляющая локомотивов, применяющих разные источники энергии, а также выявлены перспективы решения экологических проблем в процессе проектирования и создания инновационных локомотивов. В [10] по комплексным критериям МАИ установлены наиболее и наименее эффективные способы утилизации отходов с учетом как экономических, так и экологических

составляющих. Таким образом, выбранный метод, показал свою состоятельность в близких тематике данной статьи исследованиях.

Цель исследования – разработка и апробация подхода к оценке загрязнения окружающей среды урбанизированных территорий автомобильным транспортом.

Методы исследования

Разработка индекса загрязнения урбанизированных территорий автотранспортом включала два основных этапа:

- 1) определение приоритетов между показателями с помощью метода анализа иерархий;
- 2) поиск математического решения, позволяющего объективно ранжировать по нарастанию опасности сочетания принятых классов загрязнения атмосферного воздуха выбросами, уровень шума и загрязнение почвы.

Метод анализа иерархий заключается в разложении проблемы на более простые составные части и дальнейшей обработке последовательности суждений по парным сравнениям. Данный метод позволяет обосновать принятие решений при наличии нескольких критериев. Он включает сравнение каждого параметра с другими и присвоение относительного значения важности. Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы в виде иерархии. Для того чтобы установить приоритеты критериев и получить оценки для альтернативных решений, в МАИ строятся матрицы парных сравнений. По каждой матрице определяется вектор локальных приоритетов [5]. Метод анализа иерархий основывается на основных принципах:

1. *Разделение*: разбиение проблемы на более мелкие, управляемые компоненты, которые затем организуются в иерархическую структуру, что позволяет идентифицировать ключевые элементы проблемы и их отношения.
2. *Парные сравнения*: оценка относительной важности каждого параметра путем их попарного сравнения в иерархии на том же уровне.
3. *Иерархический синтез*: синтезирование парных сравнений для получения общего ранжирования приоритетов параметров на каждом уровне иерархии.
4. *Анализ согласованности*: оценка взаимного соответствия парных сравнений для обеспечения логичности суждений с помощью коэффициента согласованности.
5. *Анализ чувствительности*: оценка восприимчивости результатов к изменениям в парных сравнениях для идентификации наиболее критических параметров и выявления устойчивости решения.

Результаты и их обсуждение

На основании ранее проведенных многолетних исследований состояния окружающей среды [11–13], подверженной влиянию автотранспорта, с помощью метода анализа иерархий выявлено три основных параметра:

загрязнение атмосферы выбросами, уровень шума и загрязнение почвы. Для определения веса каждого параметра в загрязнение урбанизированных территорий автотранспортными средствами на основании шкалы относительной важности была составлена матрица попарных сравнений (табл. 1), в которой каждый элемент отражает отношение значимости одного критерия в отношении другого. В данном случае элемент в первой строке и второй колонке равен двум, что означает, что загрязнение атмосферы считается в два раза более важным параметром, чем уровень шума и в три раза важнее загрязнения почв.

Таблица 1. Матрица попарных сравнений и приоритетов

Параметр	Загрязнение атмосферы (ЗА)	Уровень шума (УШ)	Загрязнение почвы (ЗП)
Загрязнение атмосферы (ЗА)	1	2	3
Уровень шума (УШ)	1/2	1	2
Загрязнение почвы (ЗП)	1/3	1/2	1
Сумма	1,83	3,5	6,0

Источник: составлено С.А. Новиковой.

Выбросы от автомобильного транспорта осуществляются напрямую в атмосферный воздух, непосредственно воздействуя на данный компонент окружающей среды и, как следствие, здоровье людей, проживающих в зоне загрязнения. Шумовое загрязнение занимает второе место в рейтинге экологических проблем (после загрязнения атмосферного воздуха), влияющих на здоровье населения урбанизированных территорий¹. Почва является аккумулятором вредных веществ, в том числе поступающих из атмосферного воздуха. Оценка опасности загрязненной почвы населенных пунктов определяется ее ролью как источника вторичного загрязнения воздушного бассейна².

Далее рассчитывалась матрица приоритетов (см. табл. 1), где каждый элемент матрицы равен сумме элементов строки, поделенной на сумму элементов столбца. Так была получена нормированная матрица, которая использовалась для расчета весов параметров (табл. 2).

Таблица 2. Нормированная матрица

Параметр	(а ₁) Загрязнение атмосферы (ЗА)	(а ₂) Уровень шума (УШ)	(а ₃) Загрязнение почвы (ЗП)
(А ₁) Загрязнение атмосферы (ЗА)	0,55	0,57	0,50
(А ₂) Уровень шума (УШ)	0,27	0,29	0,33
(А ₃) Загрязнение почвы (ЗП)	0,18	0,14	0,17

Источник: составлено С.А. Новиковой.

Расчет весов (w) параметров осуществлялся по формулам:

$$w_1 = \sqrt[3]{A_1 a_1 \times A_1 a_2 \times A_1 a_3} ; \quad (1)$$

¹ Assessment of potential health benefits of noise abatement measures in the EU // Phenomena project. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f4cd7465-a95d-11eb-9585-01aa75ed71a1> (accessed: 25.10.2024).

² МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

$$w_2 = \sqrt[3]{A_2 a_1 \times A_2 a_2 \times A_2 a_3}; \quad (2)$$

$$w_2 = \sqrt[3]{A_3 a_1 \times A_3 a_2 \times A_3 a_3}. \quad (3)$$

1. Загрязнение атмосферы (ЗА):

$$w_1 = w_{ЗА} = \sqrt[3]{0,55 \times 0,57 \times 0,5} = 0,538 \sim 0,5.$$

2. Уровень шума (УШ):

$$w_2 = w_{УШ} = \sqrt[3]{0,27 \times 0,29 \times 0,33} = 0,296 \sim 0,3.$$

3. Загрязнение почвы (ЗП):

$$w_3 = w_{ЗП} = \sqrt[3]{0,18 \times 0,14 \times 0,17} = 0,163 \sim 0,2.$$

Веса параметров нормируются так, чтобы их сумма была равна 1. Таким образом, веса параметров (w) соответствуют: ЗА – 0,5, УШ – 0,3, ЗП – 0,2. По сути, веса критериев равны среднему арифметическому элементов каждой строки нормированной матрицы. Среднее арифметическое позволяет получить представление о важности каждого критерия в целом. Согласно полученным весам критериев, загрязнение атмосферы имеет наибольший вклад в общее загрязнение урбанизированных территорий (50 %), затем следуют уровень шума (30 %) и загрязнение почвы (20 %).

Далее в работе была определена степень согласованности данных. Под согласованностью понимается то, что при наличии основного (базового) массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них, то есть отношения элементов всей матрицы не должны быть противоречивыми. Степень согласованности была определена по формуле

$$\lambda_{\max} = 0,5 \times 1,83 + 0,2 \times 3,5 + 0,2 \times 6 = 3,16. \quad (4)$$

Для проверки согласованности матриц суждений использовался индекс согласованности (ИС):

$$ИС = \lambda_{\max} - \frac{n}{n-1}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение матрицы; n – количество параметров; $(n - 1)$ – число всех возможных парных сравнений данного элемента в фиксированной строке для квадратной матрицы n -го порядка.

Следовательно, ИС имеет смысл отклонения от абсолютной согласованности, приходящегося на одно парное сравнение. Вводится критерий, называемый отношением согласованности (ОС):

$$ОС = ИС/СС, \quad (6)$$

где СС – индекс случайной согласованности. Значения СС в теории МАИ заранее вычислены. Приемлемая величина ОС не более 20 %. В частности, $ИС = (3,165 - 3) / (3 - 1) = 0,083$, $ОС = 0,083/0,58 = 0,14 = 14 \%$, следовательно, данные согласованы.

В качестве основы классификации предлагаемого комплексного индекса загрязнения авторами использовались градации, приведенные в нормативных документах³ по трем показателям: загрязнение атмосферы, уровень шума, загрязнение почвы, каждый из которых может быть охарактеризован четырьмя классами, что соответствует 64 вариантам сочетаний этих классов. Принимая, что одинаковые по порядку классы разных показателей эквивалентны друг другу. Следовательно, можем рассчитать индекс загрязнения урбанизированных территорий автотранспортными средствами (ИЗУТ_{АТС}), который равен сумме произведений весов параметров (w) на соответствующие значения параметров:

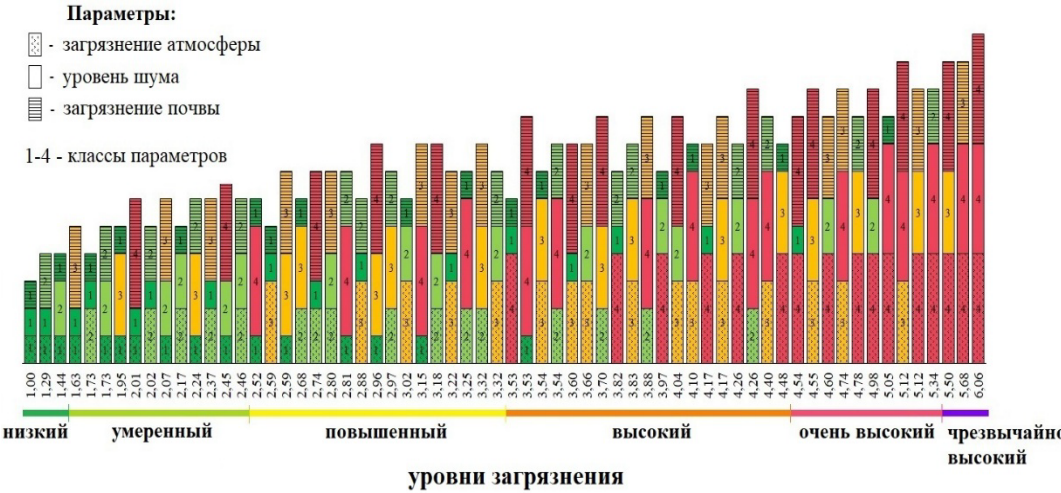
$$\text{ИЗУТ}_{\text{АТС}} = 0,5 \times (\text{ЗА})^{1,m} + 0,3 \times (\text{УШ})^{1,m} + 0,2 \times (\text{ЗП})^{1,m}, \quad (7)$$

где 0,5, 0,3, 0,2 – математические веса химического загрязнения атмосферы, уровня шума и химического загрязнения почвы соответственно; ЗА, УШ и ЗП – индексы классов показателей по порядку; $m = 0$, если ЗА, УШ, ЗП = 1; $m = 3$, если ЗА, УШ, ЗП > 1.

Возведение в степень 1,3 позволяет корректно ранжировать классы предлагаемого индекса загрязнения с учетом сочетаний классов параметров (выбросов в атмосферу, уровня шума, загрязнение почвы) и их математических весов. Ранжируя значения индекса, получаем классификацию для оценки загрязнения урбанизированных территорий автотранспортом (рис.).

В качестве апробации предлагаемого индекса на основе результатов ранее проведенных исследований [11–13] авторами были осуществлены расчеты для городов Иркутской агломерации, которые показали, что рассматриваемая территория отличается высоким уровнем загрязнения (табл. 3). Следует отметить, что при одинаковых качественных показателях количественные значения индекса отличаются. Так, в городах Иркутск и Ангарск значения ИЗУТ_{АТС} составляют 3,54, что соответствует верхней границе предложенной градации (см. рис.), в то время как в Усолье-Сибирском и Шелехове ИЗУТ_{АТС} равны 4,48, т.е. практически на границе с чрезвычайно высоким уровнем загрязнения, что свидетельствует о необходимости привлечения повышенного внимания к проблеме загрязнения городов. Исходя из ранжирования параметров первоочередные меры должны быть направлены на снижение выбросов в атмосферный воздух (ЗА = 4).

³ См.: Постановление главного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 „Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания“»; РД 52.04.667-2005. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию.



Визуализация классификации комплексного индекса загрязнения урбанизированных территорий автотранспортными средствами

Источник: составлено С.А. Новиковой.

Таблица 3. Индекс загрязнения урбанизированных территорий автотранспортными средствами (ИЗУТ_{АТС}) в городах Иркутской агломерации

Города Иркутской агломерации	Загрязнение атмосферы (ЗА)	Уровень шума (УШ)	Загрязнение почвы (ЗП)	ИЗУТ _{АТС}	Уровень загрязнения
Иркутск	3	3	1	3,54	Высокий
Ангарск	3	3	1	3,54	Высокий
Усолье-Сибирское	4	3	1	4,48	Высокий
Шелехов	4	3	1	4,48	Высокий

Источник: составлено С.А. Новиковой, С.М. Угай.

Таким образом, в работе предложен способ определения индекса загрязнения урбанизированных территорий автотранспортными средствами, позволяющий выявить уровень техногенной нагрузки на состояние окружающей среды, а метод анализа иерархии обеспечивает системный подход при оценке комплексных экологических проблем.

Заключение

Интерес к использованию результатов сводных расчетов для управления качеством компонентов окружающей среды в городах Российской Федерации постоянно возрастает. Более того, одной из стратегических задач развития страны является кардинальное снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах⁴.

Описанный в работе способ позволяет в первом приближении оценить общую загрязненность урбанизированных территорий на основе трех показателей:

⁴ Указ Президента РФ от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

- 1) загрязнение атмосферного воздуха;
- 2) уровень шума;
- 3) загрязнение почвы.

При наличии апробации технически данный подход позволяет получать необходимую информацию об уровне загрязнения урбанизированных территорий, удобен и прост в использовании. Комплексный индекс может считаться универсальным, так как основан на общепринятых классификациях включенных в него показателей и потенциально может быть применен в любом населенном пункте, подпадающем под действие нормативно-правовых актов⁵.

Список литературы

- [1] Новикова С.А. Влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения Байкальского региона // Национальные приоритеты России. 2018. № 3 (30). С. 65–71.
- [2] Седых В.А., Куропан С.А., Мазуров Г.И., Козлов А.Т., Закусилов В.П. Интегральная геоэкологическая оценка техногенного загрязнения городской среды крупного центра металлургической промышленности (на примере г. Липецка) // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2023. Т. 17. № 2. С. 84–93. <http://doi.org/10.22363/10.31161/1995-0675-2023-17-2-84-93>
- [3] Угай С.М., Голохваст К.С., Михайлова О.Г. Экологическая оценка шумового загрязнения Приморского края по мнению его жителей: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. 110 с.
- [4] Игнатьев Ю.А., Александрова М.Л., Кульбицкий Г.Н., Бабаина Е.В. Интегральный индекс техногенного загрязнения как мера экологической безопасности потребляемой человеком продукции // Медицина экстремальных ситуаций. 2011. № 1 (35). С. 22–28.
- [5] Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Thomas L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process, 1993. 320 с.
- [6] Мыслыва Т.Н. Использование метода анализа иерархий и оценки факторов множественного влияния при прогнозировании потенциальных зон залегания подземных вод // Мелиорация. 2021. № 3 (97). С. 50–66.
- [7] Шестаков Н.И., Титаренко Б.П. Сравнение биопозитивности покрытий дорожных одежд методом анализа иерархий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 3 (84). С. 25–34.
- [8] Ковальский Ф.С., Мосолов А.С., Акинин Н.И. Анализ применения методов смещенного идеала и анализа иерархий при категорировании объекта топливно-энергетического комплекса // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 3. С. 15–20.
- [9] Королева Л.А., Малыгин И.Г. Использование метода анализа иерархий для экологической оценки локомотивной тяги на водородных топливных элементах // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. 2023. № 7. С. 18–26.

⁵ См.: Постановление главного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 „Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания“»; РД 52.04.667-2005. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию.

- [10] Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б. Разработка критериев оценки эффективности методов обращения с твердыми коммунальными отходами // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 3. С. 20–28.
- [11] Новикова С.А. Загрязнение атмосферы крупных городов Иркутской области выбросами автотранспортных средств // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2015. Т. 11. С. 64–82.
- [12] Новикова С.А. Оценка шумового загрязнения города Иркутска автомобильным транспортом // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 5. С. 111–120. <http://doi.org/10.22363/10.31857/S2587-556620195111-120>
- [13] Новикова С.А. Оценка влияния выбросов автомобильного транспорта на геоэкологическое состояние почв и растительности городов Иркутской агломерации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31, № 4. С. 533–543. <http://doi.org/10.22363/10.22363/2313-2310-2023-31-4-000-0>

Сведения об авторах:

Новикова Светлана Александровна, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность», Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; аспирант Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Российская Федерация, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, ул. Центральная, д. 26. ORCID: 0000-0003-2534-3379; SPIN-код: 8593-1545. E-mail: eco-science@mail.ru

Угай Сергей Максимович, доктор технических наук, доцент, начальник специального опытного проектно-конструкторско-технологического бюро, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Российская Федерация, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, ул. Центральная, д. 26. ORCID: 0000-0003-1615-5544; SPIN-код: 6524-6765. E-mail: usm64@mail.ru