



УДК 628.3:338.001.36

А. А. КАДЫСЕВА^{1,2}, д-р биол. наук, проф. кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций;
М. М. ПУКЕМО², канд. техн. наук, председатель совета директоров;
О. В. КАМАРДИНА², ведущий инженер-технолог; **В. В. МИРОНОВ³**, д-р техн. наук, проф. кафедры инженерных систем и сооружений;
Д. А. БЕДА¹, аспирант

ПРИНЯТИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

Тел.: (499) 976-49-39; эл. почта: kadyseva@mail.ru

²ООО «Альта Групп».

Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 16, этаж 1 пом. Х ком. 24.

Тел.: (499) 286-20-50

³ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38.

Тел.: (3452) 28-39-23

Ключевые слова: сточные воды, очистка сточных вод, очистные сооружения, система водоотведения, жизненный цикл.

В статье рассматривается методика оценки стоимости жизненного цикла как инструмента принятия инженерного решения. Для анализа приведена оценка и сравнение стоимости жизненного цикла двух сценариев выбора систем водоотведения для малых населенных пунктов: собственные очистные сооружения и транспортировка сточных вод на групповые очистные сооружения. Исследование включает в себя анализ затрат на строительство, эксплуатацию, реконструкцию и утилизацию каждого из этих вариантов, на протяжении всего срока службы систем. Результаты расчетов стоимости жизненных циклов позволили сделать выводы о том, какой из вариантов является приемлемым в долгосрочной перспективе.

Инженерные решения играют ключевую роль в современном мире, охватывая различные сферы – от строительства и производства до информационных технологий и экологии. Выбор оптимального инженерного решения является критически важным этапом, который определяет не только эффективность и производительность системы, но и ее экономическую целесообразность и устойчивость.

Оценка стоимости жизненного цикла (*LCC*) представляет собой инструмент, позволяющий всесторонне оценить все затраты и выгоды на протяжении всего жизненного цикла. Этот метод включает идентификацию и анализ всех возможных затрат, начиная с начальных инвестиций и заканчивая эксплуатационными расходами и утилизацией. Применение инструмента *LCC* особенно актуально при тщательном анализе вариантов и выборе оптимального решения.

Для демонстрации *LCC* как инструмента принятия решений рассмотрим два основных сценария управления сточными водами в сельских населенных пунктах: строительство собственных очистных сооружений (рис. 1) и транспортировка стоков на групповые очистные сооружения (рис. 2). Выбор оптимального решения играет важную роль, поскольку он влияет на обеспечение экологической безопасности, повышение экономической эффективности и улучшение уровня комфорта населения.

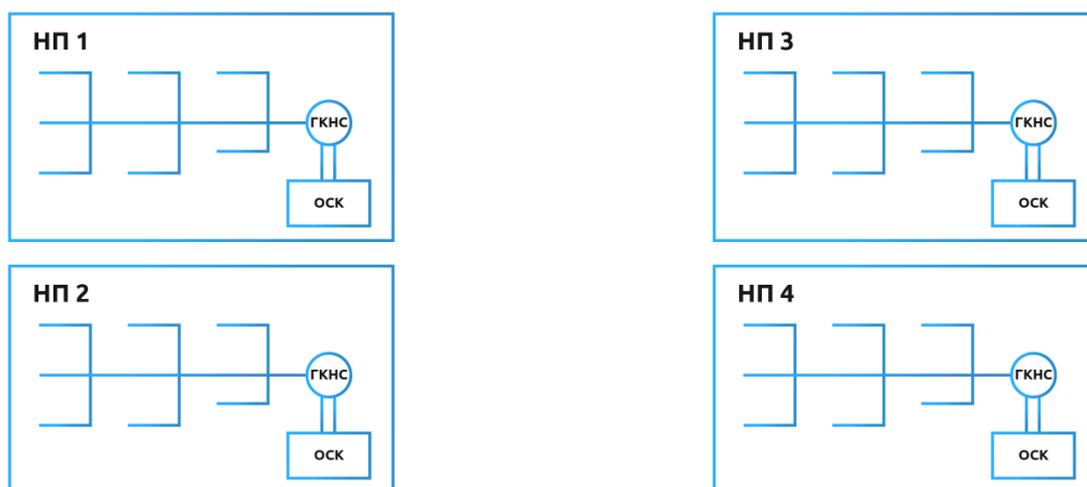


Рис. 1. Иллюстрация первого сценария: строительство собственных очистных сооружений

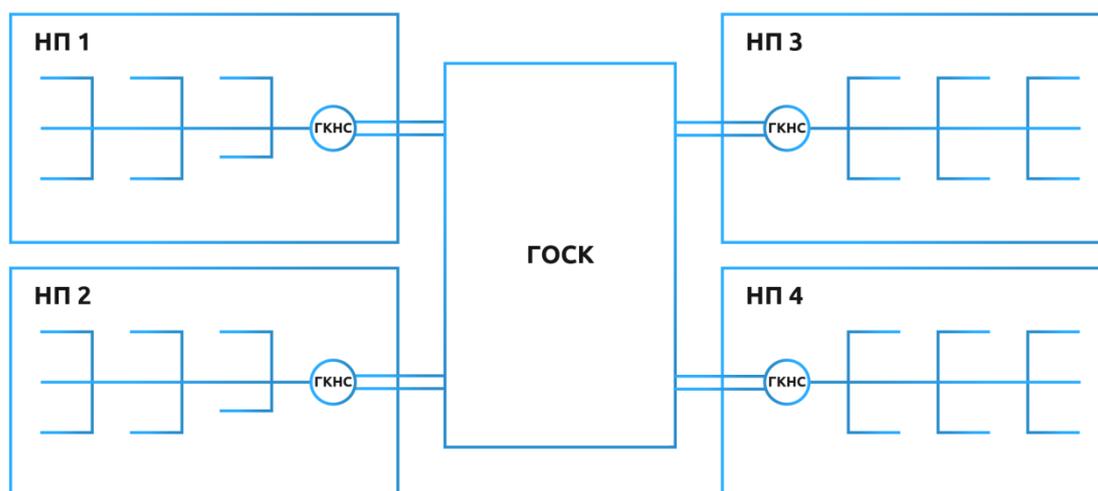


Рис. 2. Иллюстрация второго сценария: транспортировка сточных вод на групповые очистные сооружения

Оценка стоимости жизненного цикла (*LCC*) обоих сценариев позволяет определить наиболее экономически выгодный и экологически безопасный вариант для населенного пункта. Эта оценка учитывает не только первоначальные инвестиции и текущие расходы, но и долгосрочные последствия каждого



варианта. Она помогает принять обоснованное решение, которое будет наилучшим образом соответствовать потребностям и ресурсам населенного пункта.

Модель оценки позволяет рассчитать совокупные затраты на строительство (C), эксплуатацию (A), сервисное обслуживание и ремонт (M), реконструкцию (R), снос и утилизацию (S) [1].

$$LCC = C + R + A + M + S, \text{ млн. руб.} \quad (1)$$

Для первого сценария (рис. 1) оценка производилась на основе классификации очистных сооружений справочника НДТ по производительности [2], нормам водоотведения [3].

Стоимость строительства (C) представляет собой совокупность затрат, включающих в себя стоимость оборудования (K), а также расходы на строительно-монтажные работы (B) и проектно-изыскательские мероприятия (P). Данная структура затрат может быть выражена формулой 2. Эта формула отражает комплексный подход к оценке всех необходимых вложений, требуемых для реализации строительного проекта. Она позволяет учесть как первоначальные капитальные затраты на приобретение оборудования и проведение изысканий, так и расходы, связанные с непосредственным выполнением строительных и монтажных работ.

$$C = P + B + K, \text{ млн. руб.} \quad (2)$$

Определение стоимости очистных сооружений (K) возможно посредством анализа коммерческих предложений и иных документов, отражающих совокупную стоимость данных объектов. В рамках настоящего исследования стоимость была установлена удельным методом – 1 м³ сточных вод, подлежащих очистке, на основе данных, представленных на сайте [4] в период с 2017 по 2024 гг.

Стоимость строительно-монтажных работ (B) может быть определена на основе анализа коммерческих предложений, смет или иных документов, предоставленных организациями, оказывающими услуги по строительству данного объекта. В рамках настоящего исследования для укрупненного расчета стоимость строительства была принята в размере 20 % от стоимости очистных сооружений. Стоимость проектных работ (P) была определена на основании источников [5–6].

Объективная оценка эксплуатационных затрат является наиболее сложной задачей из-за множества влияющих на них факторов [7]. Для укрупненного расчета эксплуатационные затраты (A) в данной работе приняты на уровне 2 % от стоимости капитальных затрат ежегодно на протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ). Затраты на реконструкцию или капитальный ремонт (R) приняты в размере 40 % от стоимости оборудования с учетом периода капитального ремонта емкостного оборудования. Снос и утилизация (S) оцениваются в 50 % от стоимости оборудования по истечении нормативного срока эксплуатации.

Для второго сценария оценка производилась из расчета строительства 1 км напорного трубопровода в две нитки от канализационной насосной станции (КНС) населенного пункта до групповых ОС с учетом части затрат на строительство и эксплуатацию головных очистных сооружений.

При оценке стоимости жизненного цикла учитывалось количество периодов, которые в сумме равны общей продолжительности жизненного цикла продукции.



В рамках расчета оценки жизненного цикла были подготовлены следующие предположения и базовая информация о системе в соответствии с [8]:

- технологические рамки: очистные сооружения осуществляют полную биологическую очистку поступающих сточных вод;

- данные о количестве и качестве поступающих сточных вод приняты для хозяйственно-бытовых сточных вод четырех категорий сельских поселений (табл. 1);

- расчет сценариев производился от точки сбора всего объема сточных вод населенного пункта – от главной канализационной насосной станции;

- данные о внутрипоселковых сетях системы водоотведения (материал труб, протяженность, диаметры, количество колодцев и насосных станций) в расчете не учитывались;

- географические рамки обусловлены II климатическим районом (поясом) согласно приложению 13 [9], нескальными грунтами;

- временные рамки ограничены сроком службы материала, из которого изготовлены очистные сооружения.

Расчеты первого сценария оценки жизненного цикла проводились для сельских поселений, которые в зависимости от числа жителей классифицируются на малые, средние, большие и крупные, для каждого типа населенного пункта в зависимости от максимального числа жителей были определены мощность очистных сооружений [2] и категория соответствия очистных сооружений.

При расчетах учитывались очистные сооружения со сроком службы не менее 25 лет, оценка которого проводилась на основе анализа паспортных данных емкостного оборудования, представленного на российском рынке. Анализ показал, что срок службы металлических конструкций составляет 10 лет, бетонных – 15 лет, стеклопластиковых и сооружений из нержавеющей стали – 25 и 50 лет соответственно, а полипропиленовых и полиэтиленовых сооружений – до 60 лет. Для оценки стоимости эксплуатации и реконструкции ОС принят максимальный срок эксплуатации 60 лет для всех материалов ОС.

В рамках второго сценария оценки ЖЦ были проведены расчеты для сельских поселений аналогично первому сценарию. Для каждого типа населенного пункта, в зависимости от максимального числа жителей, были определены диаметры напорных трубопроводов от КНС до групповых очистных сооружений (ГОСК). Расстояние от населенного пункта до очистных сооружений было принято равным 20 км. Это значение было выбрано на основании исследования [10], которое показало, что внутрирайонное расстояние большинства населенных пунктов Российской Федерации составляет от 11 до 30 км. Гарантированный срок эксплуатации полиэтиленовых труб составляет не менее 50 лет, а срок эксплуатации может превышать 100 лет. Для расчета *LCC* был принят максимальный срок эксплуатации очистных сооружений, составляющий 60 лет. Более длительный срок эксплуатации приведет к моральному устареванию технологий.

Стоимость строительства напорной сети от КНС до очистных сооружений определена согласно [4]. Диаметр напорного трубопровода был определен на основе расчета объема сточных вод, поступающих от населенного пункта. Глубина заложения трубопровода принята равной 2 м. Материал труб – полиэтилен.



Результаты проведенных расчетов (рис. 3) показали, что стоимость жизненного цикла очистных сооружений из различных материалов емкостного оборудования варьируется в зависимости от количества жителей населенного пункта. Для крупных населенных пунктов может быть экономически целесообразнее строительство напорного трубопровода до ГОСК, однако для населенных пунктов с численностью населения менее 2500 человек это может оказаться слишком дорогостоящим. Независимо от численности населения, на протяжении всего жизненного цикла варианты из стеклопластика, полипропилена и полиэтилена остаются наиболее выгодными: полипропилен значительно превосходит другие материалы, а стеклопластик занимает промежуточное положение. Сравнение эксплуатационных затрат демонстрирует, что расходы на транспортировку сточных вод до центральных КОС существенно превышают затраты на эксплуатацию собственных очистных сооружений, что объясняется значительными энергозатратами на транспортировку на большие расстояния. Соотношение капитальных и эксплуатационных затрат подвержено изменчивости в зависимости от ряда факторов, таких как протяженность коллектора, тип грунта, глубина заложения, численность населения и материал оборудования. Для каждого конкретного случая требуется детальный анализ с учетом специфики условий и параметров, что позволит более точно определить структуру и величину затрат.

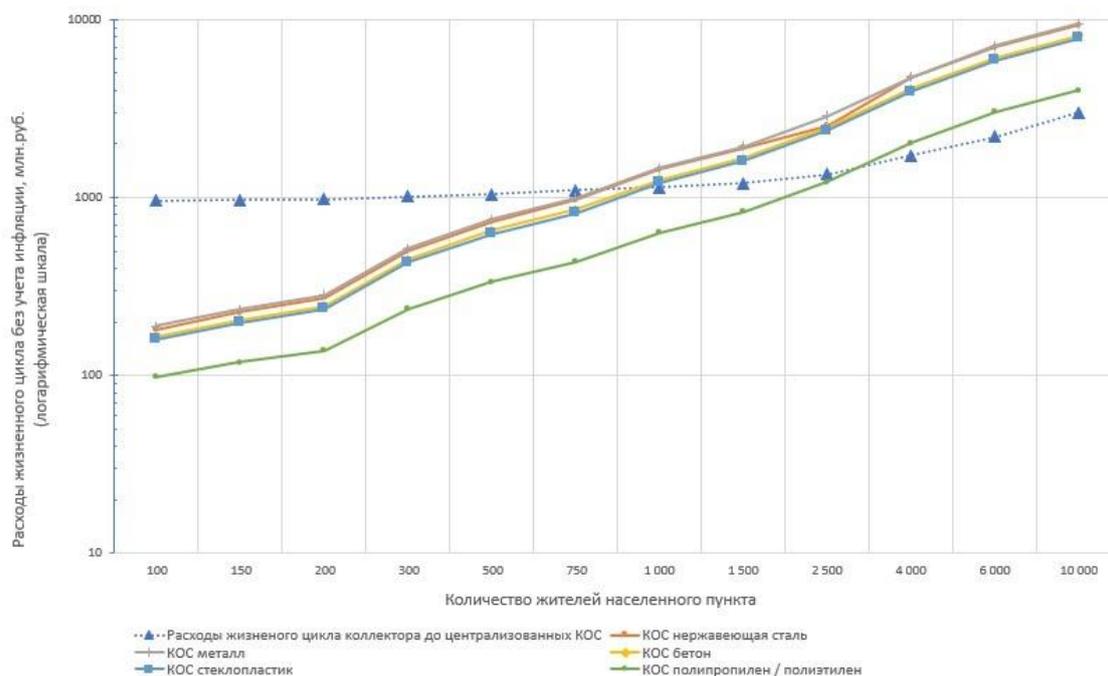


Рис. 3. Стоимость жизненного цикла для рассматриваемых сценариев систем водоотведения населенных пунктов на период 60 лет

Сравнение стоимости жизненных циклов различных инженерных решений играет ключевую роль в процессе принятия обоснованных управленческих решений. Этот метод позволяет определить наиболее экономически эффективные варианты строительства и эксплуатации, что способствует снижению общих затрат на содержание и обслуживание объектов. Оценка не только



первоначальных инвестиций в проект, но и затрат на протяжении всего жизненного цикла является критически важной для долгосрочных проектов. Применение подхода *LCC* способствует выбору решений, которые обеспечивают долгосрочную устойчивость и эффективность использования ресурсов, что полностью соответствует принципам устойчивого развития. Внедрение данного подхода позволяет учитывать все аспекты затрат, включая эксплуатационные расходы и затраты на техническое обслуживание, что обеспечивает более точное прогнозирование и планирование финансовых ресурсов. В результате, использование *LCC* способствует не только оптимизации затрат, но и улучшению экологической безопасности и уровня комфорта населения, что делает его незаменимым инструментом в современной практике управления инфраструктурными проектами.

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bhoje, V & Saner Pritesh Life Cycle Cost Analysis of Sewage Treatment Plants / Bhoje, V & Saner, Amol & Aher, Pritesh // International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. – 2019. – Vol. 3. – P. 426–429.
2. Очистка сочных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : информационно-технический справочник ИТС 10-2019. – Москва : Бюро НТД, 2019. – 416 с.
3. СП 129.13330.2019. Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 31 декабря 2019 г. № 925/пр : актуализированная редакция СНиП 3.05.04-85* : введен в действие с 01 июля 2020 г. – Москва, 2020. – 43 с.
4. Реестр контрактов. – Текст : электронный // Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок : [официальный сайт]. – 2024. – URL : <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html> (дата обращения : 20.06.2024).
5. Об утверждении укрупненных нормативов цены строительства» Укрупненные нормативы цены строительства. НЦС 81-02-14-2024. Сборник № 14. Наружные сети водоснабжения и канализации : приказ Минстроя России от 16 февраля 2024 г. № 113/пр. – Текст : электронный // Официальный сайт Министерства строительства Российской Федерации : [официальный сайт]. – 2024. – URL : <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (дата обращения : 20.06.2024).
6. Государственный Сметный Норматив «Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве «Объекты водоснабжения и канализации». – Текст : электронный // Официальный сайт Министерства строительства Российской Федерации : [официальный сайт]. – 2024. – URL : <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (дата обращения : 20.06.2024).
7. Карпов, А. В. Использование методики расчета *LCC* для оценки качества обслуживания и ремонта оборудования / А. В. Карпов, Р. М. Розенталь. – Текст : электронный // Группа компаний Приоритет : [сайт]. – URL : <https://www.centri-prioritet.ru> (дата обращения: 16.06.24).
8. ГОСТ Р ИСО 14044-2021. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации. – Текст : электронный // Каталог национальных стандартов : [сайт]. – URL : <https://www.rst.gov.ru> (дата обращения: 16.06.24).



9. Р 2.2.2006-05. 2.2. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда : утвержден Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 29.07.2005. – Текст : электронный // Информационно-правовая система ГАРАНТ : [сайт]. – URL: <https://base.garant.ru/12142897/> (дата обращения: 14.06.24).

10. Карачурина, Л. Б. Опыт расчета расстояний между разными типами населенных пунктов России (для оценки дальности миграции населения) / Л. Б. Карачурина, Н. В. Мкртчян. – Текст : электронный // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Том 68, № 3. – С. 418–442. – DOI 10.21638/spbu07.2023.301. – EDN VLMGFM.

KADYSEVA Anastasiya Aleksandrovna¹, doctor of biological sciences, professor of the chair of agricultural water supply, wastewater disposal, pumps and pump stations; PUKEMO Mikhail Mikhaylovich², candidate of technical sciences, chairman of the board of directors; KAMARDINA Olga Vladimirovna², leading process engineer; MIRONOV Viktor Vladimirovich³, doctor of technical sciences, professor of the chair of engineering systems and structures; BEDA Daniil Andreevich¹, postgraduate student

ENGINEERING DECISION-MAKING BASED ON LIFE CYCLE COST ANALYSIS

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy.
49, Timiryazevskaya St., 127434, Moscow, Russia.

Tel.: (499) 976-49-39; e-mail: kadyseva@mail.ru

²Alta Group LLC.

16, Nagatinskaya St., 115487, Moscow, Russia. Tel.: (499) 286-20-50

³Tyumen Industrial University.

38, Volodarskogo St., 625000, Tyumen, Russia. Tel.: (3452) 28-39-23

Key words: wastewater, wastewater treatment, treatment facilities, wastewater disposal system, life cycle.

The article examines the methodology of life cycle cost assessment as a tool for making engineering decisions. For analysis, we present an assessment and comparison of the life cycle costs of two scenarios for wastewater disposal in small settlements: using own treatment facilities or transporting wastewater to group treatment plants. The study includes an analysis of costs for construction, operation, reconstruction, and disposal of each of these options throughout the entire service life of the systems. The results of the life cycle cost analysis have allowed us to draw conclusions about which option would be most feasible in the long run.

REFERENCES

1. Bhoje V., Saner Amol, Aher Pritesh. Life Cycle Cost Analysis of Sewage Treatment Plants. International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, 2019, Vol. 3, P. 426-429.

2. Ochistka stochnykh vod s ispolzovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy, gorodskikh okrugov [Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts]: informatsionno-tekhnicheskii spravochnik ITS 10-2019. Moscow, Byuro NTD, 2019, 416 p.



3. SP 129.13330.2019. Naruzhnye seti i sooruzheniya vodosnabzheniya i kanalizatsii [External water supply and sewerage networks and structures]: svod pravil: utverzhden prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 31 dekabrya 2019 g. № 925/pr: aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 3.05.04-85*: vveden v deystvie s 01 iyulya 2020 g. Moscow, 2020, 43 p.

4. Reestr kontraktov [Contract register]. Ofitsialny sait Edinoy informatsionnoy sistemy v sfere zakupok. 2024. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html> (accessed: 20.06.2024).

5. Ob utverzhdenii ukрупnennykh normativov tseny stroitelstva. Ukрупnennyye normativy tseny stroitelstva. NTS 81-02-14-2024. [On approval of aggregated construction price standards. Aggregated construction price standards. NCS 81-02-14-2024] Sbornik № 14. Naruzhnye seti vodosnabzheniya i kanalizatsii: prikaz Ministroya Rossii ot 16 fevralya 2024 g. № 113/pr., 2024. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (accessed: 20.06.2024).

6. Gosudarstvenny Smetny Normativ «Spravochnik osnovnykh tsen na proektnye raboty v stroitelstve «Obekty vodosnabzheniya i kanalizatsii» [State Estimate Standard "Reference Book of Basic Prices for Design Work in Construction "Water Supply and Sewerage Facilities"]. 2024. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (accessed: 20.06.2024).

7. Karpov A. V., Rozental R. M. Ispolzovanie metodiki rascheta LCC dlia otsenki kachestva obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya [Using the LCC calculation methodology for assessing the quality of equipment maintenance and repair]. Gruppa kompaniy Prioritet. URL: <https://www.centri-prioritet.ru> (accessed: 16.06.24).

8. GOST R ISO 14044-2021. Ekologicheskii menedzhment. Otsenka zhiznennogo tsikla. [Environmental management. Life cycle assessment]. Trebovaniya i rekomendatsii Katalog natsionalnykh standartov. URL: <https://www.rst.gov.ru> (accessed: 16.06.24).

9. R 2.2.2006-05. 2.2. Gigiena truda [Labor hygiene]. Rukovodstvo po gigienicheskoy otsenke faktorov rabochey sredy i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya usloviy truda: utverzhden Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossiiskoy Federatsii 29.07.2005. Informatsionno-pravovaya Sistema. URL: <https://base.garant.ru/12142897/> (accessed: 14.06.24).

10. Karachurina L. B., Mkrtychyan N. V. Opyt rascheta rasstoyaniy mezhdru razlichnymi tipami naselennykh punktov Rossii (dlia otsenki dalnosti migratsii naseleniya) [Experience in calculating distances between different types of settlements in Russia (for assessing population migration distance)]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences], 2023, Vol. 68, № 3, P. 418–442. DOI 10.21638/spbu07.2023.301. EDN VLMGFM.

© А. А. Кадысева, М. М. Пукемо, О. В. Камардина, В. В. Миронов, Д. А. Беда,
2025

Получено: 27.05.2025 г.