

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 211–219.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 211–219.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219

EDN: RPYBGR

К ВОПРОСУ О ПРИРОДНОЙ УПЛОТНЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

**Сергей Гаврилович Колмогоров¹, Петр Леонидович Клемяционок²,
Светлана Сергеевна Колмогорова²**

¹*Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия*

²*Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Статья посвящена вопросу уплотненности глинистых грунтов. Глинистые грунты часто являются основанием зданий и сооружений. Но использование таких грунтов в качестве основания затруднено вследствие их специфических свойств, а именно зависимости строительных свойств грунта, особенно характера деформирования и прочности, от степени уплотненности. Степень уплотненности является одним из важнейших качеств глинистого грунта, определяющим во многом его поведение под нагрузкой.

Актуальность. Степень уплотненности может использоваться в качестве классификационного показателя, а также для предварительной оценки и прогнозирования поведения грунта в различных напряжено-деформированных условиях. Как известно, на уплотненность глинистых грунтов влияют различные факторы: глубина залегания, состав осадка и глин, среда и условия уплотненности.

Целью работы являлось уточнение классификации по уплотненности для глинистых грунтов с возможностью дальнейшего использования в практических целях.

Результаты. Выполнен анализ зависимости осредненных значений плотности сухого грунта от естественной влажности для некоторых генетических типов грунтов с использованием различных литературных источников (В.Д. Ломтадзе, В.М. Бевзюк., М.Ю. Абе-лев, М.П. Лысенко, В.М. Фурса, Е.И. Мишнаевская). В настоящей работе анализ позволил уточнить имеющуюся классификацию глинистых грунтов по уплотненности в зависимо-

сти от плотности сухого грунта ρ_d . Возможность получения зависимости $\rho_d = f(W_e)$ позволяет также использовать ее для уточнения классификации, определяя границы W_e , ρ_d для определенных генетических типов грунтов.

Ключевые слова: уплотненность, глинистый грунт, плотность сухого грунта, естественная влажность

Для цитирования: Колмогоров С.Г., Клемяцкионук П.Л., Колмогорова С.С. К вопросу о природной уплотненности глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219. EDN: RPYBGR

ORIGINAL ARTICLE

ON NATURAL COMPACTION OF CLAY SOILS

Sergey G. Kolmogorov¹, Petr L. Klemyatsionok²,
Svetlana S. Kolmogorova²

¹Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This article studies the compaction of clay soils. Clay soils are often used as building foundations. However, such a use is complicated by their specific properties, namely the dependence of structural properties, particularly deformation patterns and strength, on the compaction degree. Compaction is one of the most important properties of clay soil, largely determining its behavior under load. Compaction can be used as a classification indicator, as well as for preliminary assessment and prediction of the soil behavior under various stress-strain conditions. As is known, the compaction of clay soils is influenced by various factors: occurrence depth, sediment and clay composition, environment and compaction conditions.

Purpose: The aim of this work is to refine the compaction classification of clay soils with the possibility of using for practical purposes.

Methodology: The article analyzes the dependence of average density of dry soils on the natural moisture content in genetic soil types.

Research findings: The current classification of clay soils is refined, depending on the dry soil density. The obtained dry soil density dependence $\rho_d = f(W_e)$ determines the boundaries of W_e , ρ_d for certain genetic soil types.

Keywords: compaction, clay soil, dry soil density, moisture protection

For citation: Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S. On Natural Compaction of Clay Soils. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 211–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-211-219. EDN: RPYBGR

Длительное время использование природной уплотненности глин в строительных классификациях грунтов не привлекало должного внимания в связи с применением консистенции, с которой уплотненность тесно связана. Процесс природного уплотнения глин систематически рассмотрен в работе Н.Я. Денисова [5], где анализируются факторы, влияющие на уплотненность грунта: глубина залегания, состав осадка и глин, среда и условия уплотнения.

Развивая представления о нормально уплотненных, недоуплотненных и переуплотненных глинах, два последних состояния автор относит к энерге-

тически неустойчивым, способным к объемным деформациям (просадке или набуханию) при изменении условий среды. Денисовым обоснована необходимость понимания плотности как величины относительной, зависящей от условий образования и существования (диагенеза) породы.

К такому выводу по результатам проведенного им анализа с использованием показателей уплотненности приходит В.А. Приклонский [10].

И.М. Горькова уплотненность грунта, оцениваемую плотностью сухого грунта ρ_d и пористостью, включила в систему «прямых» показателей, используемых для оценки и прогноза строительных свойств грунтов, особенно характера деформирования и прочности [4]. Ее классификация и граничные значения плотности сухого грунта ρ_d и пористости n приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Классификация уплотненности глинистых грунтов
по значению плотности сухого грунта ρ_d и пористости n**

Table 1

Classification of soil compaction by dry soil density and porosity

№ п/п	Грунты	ρ_d , т/м ³	n , %
1	Слабоуплотненные	< 1,2	> 55
2	Средней уплотненности (1)	1,2–1,46	55–38
3	Средней уплотненности (1)	1,46–1,65	55–38
4	Сильно уплотненные	1,65–2,0	38–27
5	Очень сильно уплотненные	> 2,0	< 27

Для водонасыщенных в естественных условиях залегания ($S_r > 0,8$) осадочных пород в [4] установлена общая зависимость $\rho_d = f(W_e)$, справедливая в широком диапазоне влажности (до 300 %). Приведен график установленной зависимости, которая рассматривается как «выражение общего закона уплотнения и обезвоживания осадочных пород в процессе литогенезиса» [4, с. 62]. Формулы зависимости не приведены, количественно она охарактеризована интенсивностью падения ρ_d при росте влажности на 1 % для нескольких интервалов ρ_d следующим образом:

$$\text{– для } \rho_d = 0,4\text{--}0,8 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,003;$$

$$\text{– для } \rho_d = 1,2\text{--}1,6 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,02;$$

$$\text{– для } \rho_d = 1,7\text{--}2,0 \quad \Delta\rho_d / \Delta W = 0,033.$$

В [4, с. 62] отмечается, что «это объясняет известный факт, что в илах и других высоковлажных породах уменьшение влажности на несколько процентов практически не оказывает влияния на их физические и механические свойства, тогда как в более плотных глинах подобное изменение влажности уже значительно сказывается на их прочности».

В анализе относящихся к глинистым грунтам закономерностей часто приходится пользоваться осредненными показателями. Представляет интерес выяснение возможности проверки установленной в [4] зависимости с применением осредненных значений W_e , ρ_d , приведенных в различных литературных источниках.

Сводка таких данных, упорядоченных по возрастанию W_e , приведена в табл. 2. В отношении источников данных: большая их часть (22 из 31) приводится по сводке В.Д. Ломтадзе [7]. Данные по слабым морским послеледниковым глинам приводятся по работам В.М. Бевзюка [2, 3, 6]; по речным илам – по М.Ю. Абелеву [1]; по илам Черного моря – по обзорам в книге М.П. Лысенко [8]; для плотных глин – по В.М. Фурса [11], Е.И. Мишнаевской [9].

Таблица 2

**Осредненные значения естественной влажности
и плотности сухого грунта для различных видов глинистых грунтов**

Table 2

**Average values of natural moisture and density of dry soil for different types
of clay soils**

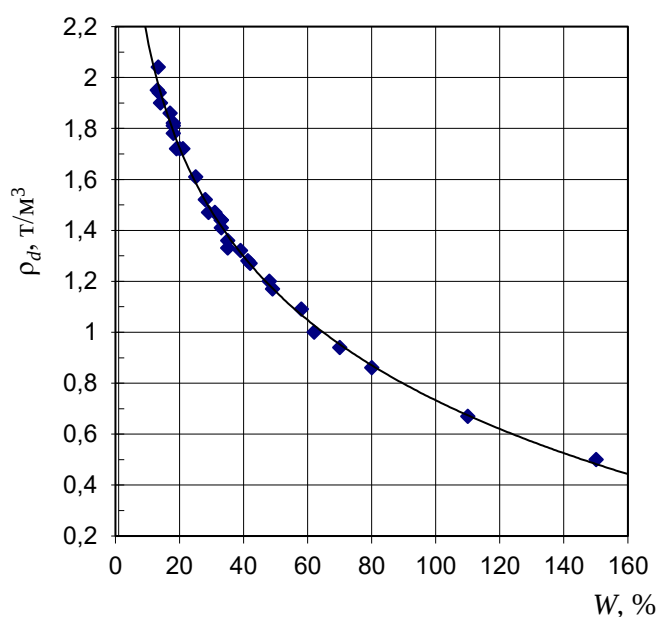
№ п/п	Грунт	W_e %	ρ_d т/м ³
1	Морена московская	13	1,95
2	Глина верхнекарбоновая	13,3	2,04
3	Глина котлинская	13,6	1,94
4	Глина нижнекембрийская	14	1,90
5	Глина верхнедевонская	17	1,86
6	Морена валдайская	18	1,82
7	Аргиллиты татарского яруса	18	1,81
8	Аргиллиты казанского яруса	18	1,78
9	Глина верхнекарбоновая	19	1,72
10	Глина нижнекарбоновая	20	1,72
11	Глина татарского яруса	21	1,72
12	Глина меотическая	25	1,61
13	Глина нижнемеловая	28	1,52
14	Глина спондиловая	29	1,47
15	Глина нижнемеловая	31	1,47
16	Глина ленточная	33	1,44
17	Глина хвалынская	33	1,44
18	Глина верхнеюрская	33	1,41
19	Глина верхнемеловая	35	1,36
20	Глина палеоген	35	1,33
21	Глина верхнеюрская	39	1,32
22	Глина ленточная, скрытотекучая	41,3	1,28

Окончание табл. 2

End of table 2

№ п/п	Грунт	W_e %	ρ_d т/м ³
23	Глина майкопская	42	1,27
24	Глина иольдиева	48	1,20
25	Глина нежнесарматская	49	1,17
26	Слабые морские глины	58	1,09
27	Речные илы	62	1,00
28	Иольдиевые глины, Карелия	70	0,94
29	Иольдиевые глины, Кольский полуостров	80	0,86
30	Илы Черного моря	110	0,67
31	Илы Черного моря	150	0,55

Расположение точек и построенный по ним график зависимости $\rho_d = f(W_e)$ приведены на рис. 1. Можно предполагать, что в общем построенная зависимость близка к установленной в [4] для $W_e < 150$ %. Проверить это можно, описав зависимость формулой.

Рис. 1. График зависимости $\rho_d = f(W_e)$ Fig. 1. $\rho_d = f(W_e)$ dependence

Такая зависимость непосредственно следует из данных рис. 2, на котором значения W_e отложены в логарифмическом масштабе. Прямая на рис. 2 проведена через две точки:

$W_1 = 10\%$; $\lg W_1 = 1$; $\rho_d = 2,16$;

$W_2 = 100\%$; $\lg W_2 = 2$; $\rho_d = 0,74$.

Ее уравнение:

$$\rho_d = 3,58 - 1,42 \lg W_e. \quad (1)$$

Если влажность выражена в долях единицы, то

$$\rho_d = 0,74 - 1,42 \lg W_e. \quad (2)$$

Интенсивность (скорость) падения ρ_d с ростом влажности дается производной:

$$\rho_d' = \left| \frac{d\rho_d}{dW_e} \right| = \frac{0,62}{W_e}. \quad (3)$$

С использованием (3) для любой влажности можно рассчитать падение ρ_d на $dW_e = 1\% = 0,01$ повышения влажности, сопоставив результаты с приведенными выше значениями по [4].

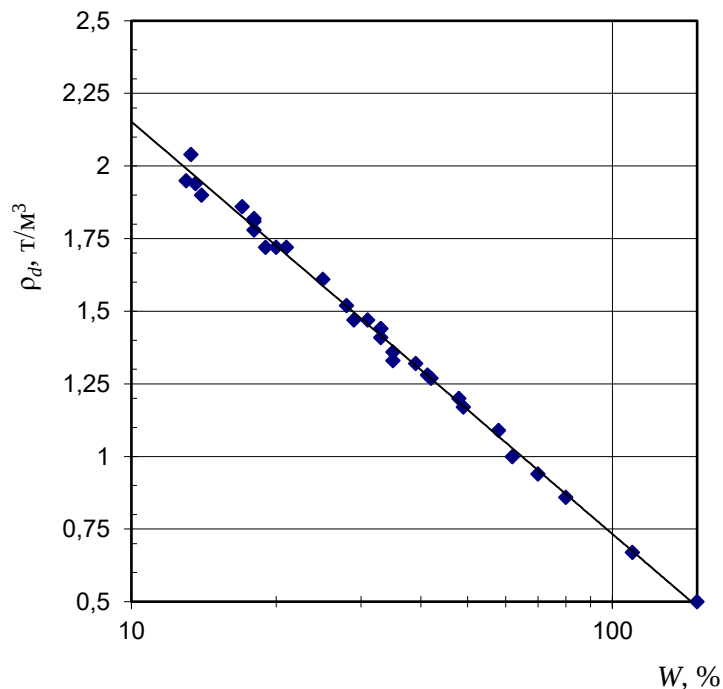


Рис. 2. График зависимости $\rho_d = f(W_e)$

Fig. 2. $\rho_d = f(W_e)$ dependence

Анализ значений W_e , ρ_d по рис. 1 и табл. 2 показывает, что для пород, уплотненных сильно, соответствующие им влажности меняются в пределах 0,1–0,2; для пород средней уплотненности – 0,25–0,35; при $W_e > 0,50$ породы слабоуплотненные. Для перечисленных и еще больших влажностей значения ρ_d' и падения $d\rho_d = \rho_d' dW_e$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

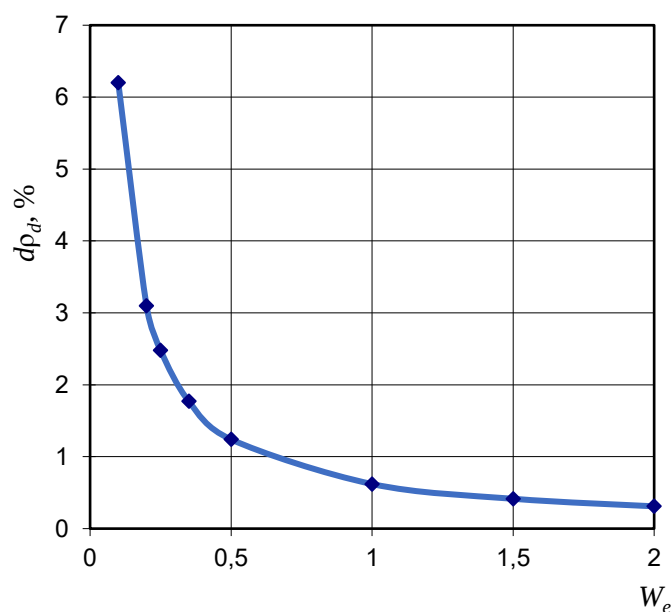
Значения ρ_d и $d\rho_d = \rho_d' dW_e$ при разной влажности W_e

Table 3

 ρ_d and $d\rho_d = \rho_d' dW_e$ values at different moisture W_e

W_e	$ \rho_d' $	$d\rho_d = \rho_d' dW_e$		W_e	$ \rho_d' $	$d\rho_d = \rho_d' dW_e$	
		д. е.	%			д. е.	%
0,1	6,2	0,062	6,2	0,5	1,24	0,012	1,2
0,2	3,1	0,031	3,1	1,0	0,62	0,006	0,6
0,25	2,48	0,025	2,5	1,5	0,415	0,004	0,4
0,35	1,77	0,018	1,8	2,0	0,31	0,003	0,3

Зависимость $\rho_d = f(W_e)$ приведена на рис. 3. Следует отметить, что значения $d\rho_d$ при $W_e = 0,2$ и $0,35$ близки к указанным в [4]. Для слабоуплотненных пород $d\rho_d$ превышают указанное в [4] значение $0,003 = 0,3\%$; как следует из данных табл. 3 и графика на рис. 3, это значение соответствует влажности $W_e = 200\%$, выходящей за пределы рассматриваемого интервала.

Рис. 3. График зависимости $d\rho_d = f(W_e)$ Fig. 3. $d\rho_d = f(W_e)$ dependence

Намеченные выше значения влажности и соответствующие им значения плотности позволяют составить классификацию глин по уплотненности, приведенную ниже (табл. 4).

Таблица 4

Классификация глинистых грунтов по уплотненности

Table 4

Clay soil classification by compaction

№ п/п	Наименование глинистых грунтов по уплотненности	$\rho_d, \text{т/м}^3$
1	Очень слабоуплотненные	$< 1,15$
2	Слабоуплотненные	$1,15-1,35$
3	Средней уплотненности	$1,35-1,60$
4	Сильно уплотненные	$1,60-1,90$
5	Очень сильно уплотненные	$> 1,90$

В заключение отметим, что сам факт получения зависимости $\rho_d = f(W_e)$ на основании осредненных данных заставляет рассматривать ее как закономерность статистическую, предполагающую изменчивость индивидуальных значений. Это можно использовать для уточнения классификации, определяя границы W_e, ρ_d аналогично проведенному в настоящей работе анализу для определенных генетических типов грунтов.

Целесообразна также увязка результатов с классификациями по показателям уплотненности В.А. Приклонского и Н.Я. Денисова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абелев М.Ю.* Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. Москва : Стройиздат, 1973. 288 с.
2. *Бевзюк В.М.* Некоторые данные о взаимосвязи природной плотности и прочности мягких глин Карелии и Кольского полуострова // Механика грунтов : труды ЛИИЖТа. Ленинград, 1966. Вып. 250. С. 74–80.
3. *Бевзюк В.М.* Методы исследования прочностных свойств слабых глинистых грунтов как естественного основания железнодорожных насыпей (на примере отложений Кольского полуострова и Карелии) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Ленинград : [б. и.], 1969. 25 с.
4. *Горькова И.М.* Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. Москва : Стройиздат, 1975. 151 с.
5. *Денисов Н.Я.* Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 288 с.
6. *Дянин А.В., Бевзюк В.М.* Условия формирования инженерно-геологических особенностей слабых глинистых отложений морского генезиса // Надежность оснований транспортных сооружений : сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 1998. С. 102–106.
7. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. Инженерная петрология. 2-е изд. Ленинград : Недра, 1984. 511 с.
8. *Лысенко М.П.* Глинистые грунты Русской платформы. Москва : Недра, 1986. 252 с.
9. *Мишинаевская Е.И.* Влияние вещественного состава глинистых грунтов на их инженерно-геологические свойства : сб. тр. МИИТ. Вып. 264. Москва : Транспорт, 1969.
10. *Приклонский В.А.* Грунтоведение. Часть 1. 3-е изд. Москва : Госгеолтехиздат, 1955. 431 с.
11. *Фурса В.М.* Строительные свойства грунтов Ленинграда. Ленинград : Стройиздат, 1975. 142 с.

REFERENCES

1. *Abelev M.Yu.* Weak Water-Saturated Clay Soils as Structure Foundations. Moscow: Stroiizdat, 1973. (In Russian)

2. Bevzyuk V.M. Some Data on the Relationship Between Natural Density and Strength of Soft Clays of Karelia and The Kola Peninsula. In: Coll. Papers "Soil Mechanics", Iss. 250. Leningrad: Nedra, 1966. Pp. 74–80. (In Russian)
3. Bevzyuk V.M. "Methods of studying strength properties of weak clay soils as a natural base for railway embankments (using sediments of the Kola Peninsula and Karelia as an example)". PhD Abstract. Leningrad, 1969. 25 p. (In Russian)
4. Gorkova I.M. Physicochemical Studies of Dispersed Sedimentary Rocks for Construction Purposes. Moscow: Stroyizdat, 1975. 151 p. (In Russian)
5. Denisov N.Ya. Construction Properties of Clay Rocks and Their Use in Hydraulic Engineering. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 288 p. (In Russian)
6. Dyanin A.V., Bevzyuk V.M. Conditions of Engineering-Geological Formation of Weak Clayey Deposits of Marine Genesis. In: Coll. Papers "Reliability of Transport Structure Foundations", Saint-Petersburg, 1998. Pp. 102–106 (In Russian)
7. Lomtadze V.D. Engineering Geology. Engineering Petrology. 2nd edn. Leningrad: Nedra, 1984. 511 p. (In Russian)
8. Lysenko M.P. Clayey Soils of the Russian Platform. Moscow: Nedra, 1986. 252 p. (In Russian)
9. Mishnaevskaya E.I. Influence of the Material Composition of Clay Soils on their Engineering-Geological Properties. In: MIIT Coll. Papers. Iss. 264. Moscow: Transport, 1969. (In Russian)
10. Priklonsky V.A. Soil Science. Part 1. 3rd edn. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1955. 431 p. (In Russian)
11. Fursa V.M. Construction Properties of Leningrad Soils. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 142 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Колмогоров Сергей Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Kolmogorovsg@list.ru

Клемяцкионек Петр Леонидович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Petr.1940@list.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovass@yandex.ru

Authors Details

Sergei G. Kolmogorov, PhD, A/Professor, Saint-Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe Road, 196601, Saint-Petersburg, Pushkin, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

Petr L. Klemyatsionok, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Petr.1940@list.ru

Svetlana S. Kolmogorova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia Kolmogorovass@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025
Одобрена после рецензирования 27.06.2025
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 11.06.2025
Approved after review 27.06.2025
Accepted for publication 03.09.2025