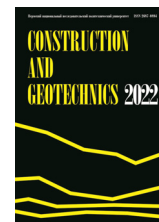




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 2, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.02

УДК 624.131

## РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ИНДЕКСА КОМПРЕССИИ ОТЛОЖЕНИЙ ИЛА НА ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ

Ю.М. Глебова, А.Л. Невзоров

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 21 апреля 2022

Одобрена: 04 июня 2022

Принята к публикации:

30 июня 2022

### Ключевые слова:

одометрические испытания, индекс компрессии, коэффициент пористости, влажность, илы, прибрежные территории.

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований сжимаемости илов, залегающих на побережье Белого моря. Подобные отложения являются характерными для прибрежных территорий во всем мире. В качестве характеристики сжимаемости послужил индекс компрессии  $c_c$ , широко используемый в современных геотехнических программно-вычислительных комплексах. Целью исследований было изучение зависимости указанной характеристики от коэффициента пористости и влажности.

Выполнена статистическая обработка данных длительных компрессионных испытаний 59 образцов ненарушенной структуры, отобранных с глубины 12–18 м. Установлено, что значения  $c_c$  варьируют для трех разновидностей илов в следующих интервалах: супесчаных 0,067–0,087, суглинистых 0,072–0,332, глинистых 0,109–0,439. Получены линейные зависимости индекса компрессии от исходных значений коэффициента пористости  $e_0$  и природной влажности  $W$  илов:  $c_c = 0,351e_0 - 0,226$  ( $R^2 = 0,75$ );  $c_c = 0,896W - 0,188$  ( $R^2 = 0,73$ ). Больше практическое значение для инженерных изысканий имеет вторая зависимость, так как определение влажности возможно на образцах нарушенной структуры, отбираемых при проходке скважин шнеком. Анализ более 30 эмпирических зависимостей, полученных отечественными и зарубежными авторами, показал, что значения параметров приведенных линейных уравнений являются характерными для слабых сильнодеформируемых глинистых грунтов морских побережий. Полученные авторами эмпирические формулы могут применяться в численном моделировании оснований, а также для вычисления модуля деформации илов при расчете осадки зданий и сооружений по традиционно применяемым методикам. В конце статьи дан пример расчета секущего и касательного одометрических модулей деформации ила с использованием полученных эмпирических зависимостей.

© ПНИПУ

© Глебова Юлия Михайловна – аспирант, e-mail: [y.glebova@narfu.ru](mailto:y.glebova@narfu.ru), ORCID: 0000-0001-9965-9099

Невзоров Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, e-mail: [a.l.nevzorov@yandex.ru](mailto:a.l.nevzorov@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-6547-2741

Yuliya M. Glebova – Postgraduate Student, e-mail: [y.glebova@narfu.ru](mailto:y.glebova@narfu.ru), ORCID: 0000-0001-9965-9099

Alexander L. Nevzorov – D. Sc. (Tech), Professor, e-mail: [a.l.nevzorov@yandex.ru](mailto:a.l.nevzorov@yandex.ru), ORCID: 0000-0002-6547-2741

## REGRESSION ANALYSIS OF COMPRESSION INDEX OF THE SOFT CLAYEY SOILS AT THE WHITE SEA COASTAL TERRITORY

J.M. Glebova, A.L. Nevzorov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

### ARTICLE INFO

Received: 21 April 2022  
Approved: 04 June 2022  
Accepted for publication:  
30 June 2022

#### Keywords:

oedometer tests, compression index, void ratio, water content, soft clayey soils, coastal territories.

### ABSTRACT

The object of the research is the compressibility of the marine soft clayey soils from the coastal territory of the White Sea. Such soil types are widespread at the coastal territories around the world. The study is devoted to analysis of dependence of a compression index  $c_c$  on a void ratio and a water content. Statistical data analysis of the long-term oedometer tests of 59 undisturbed samples taken from a depth of 12–18 meter was performed. The following intervals of a compression index for three types of soils with different content of particles  $d < 0.05$  mm was defined: 20–30 % – 0.067–0.087; 30–40 % – 0.072–0.332; 50–60 % – 0.109–0.439. The linear correlation of the compression index with an initial void ratio  $e_0$  and a natural water content  $W$  was obtained:  $c_c = 0.351e_0 - 0.226$  ( $R^2 = 0.75$ );  $c_c = 0.896W - 0.188$  ( $R^2 = 0.73$ ). The latter equation is more useful for soil exploration because the auger boring can be used for sampling of disturbed probes. The review of more than 30 empirical equations showed that the parameters of linear relationships obtained by us are typical for coastal soft clayey soils. The obtained equations can be used in a numerical simulation and to estimation an oedometer modulus for the traditional methods of settlement calculation. The secant oedometer modulus and tangent oedometer modulus are computed through a compression index at the end of article.

© PNRPU

## Введение

Активно осваиваемое в настоящее время побережье Белого моря отличают весьма сложные инженерно-геологические условия. В Двинской губе, в частности в г. Северодвинске и северных районах г. Архангельска, в основании зданий и сооружений присутствуют многометровые толщи сильносжимаемых четвертичных отложений (рис. 1). Их формирование происходило при нескольких циклах трансгрессии моря, обусловленной изменениями климата. Здесь под поверхностными отложениями мелких и пылеватых песков мощностью до 6–8 м залегают илы различного состава, заиленные пылеватые пески, заторфованные грунты и др. (рис. 2). Морские суглинки или пески, которые используются в качестве несущего слоя для свайных фундаментов, встречаются на глубине 16–20 м и более. Их отличают значения модуля деформации не менее 18 МПа. Зеркало грунтовых вод располагается на глубине до 3 м.

Подобные весьма сложные инженерно-геологические условия характерны для многих прибрежных территорий (см. [1–5]). Примером может служить г. Сантос в Бразилии, где у многоэтажных зданий, в основании которых до глубины 25 м залегают чередующиеся слои морских глин, илов и песков, из-за неравномерной осадки наблюдается отклонение от вертикали до 85 см [6; 7].

В 70–80-х гг. прошлого столетия в г. Северодвинске проводились исследования с целью обоснования возможности возведения зданий на так называемых «коротких» сваях (см. [8–10]). Их ствол полностью располагался в залегающем с поверхности слое песка, а острие не доходило до кровли илов на 1–2 м. Указанное решение оказалось приемлемым лишь для 2–3-этажных зданий, тогда как для зданий большей этажности недооценка сжи-

маемости илов вела к развитию недопустимых деформаций. По данным В.Я. Хотякова, фактические осадки фундаментов превышали прогнозируемые значения на 20–50 % [10]. Два года назад был получен практически аналогичный результат при строительстве 5-этажного жилого дома на фундаментной плите. Причиной послужила недооценка сжимаемости илов. Заметим, что наблюдения в г. Санкт-Петербурге показали двукратное превышение фактических деформаций ленточных глин над расчетными значениями за время эксплуатации 25–77 лет [11].



Рис. 1. Местоположение района исследований  
 Fig. 1. Location of the research area

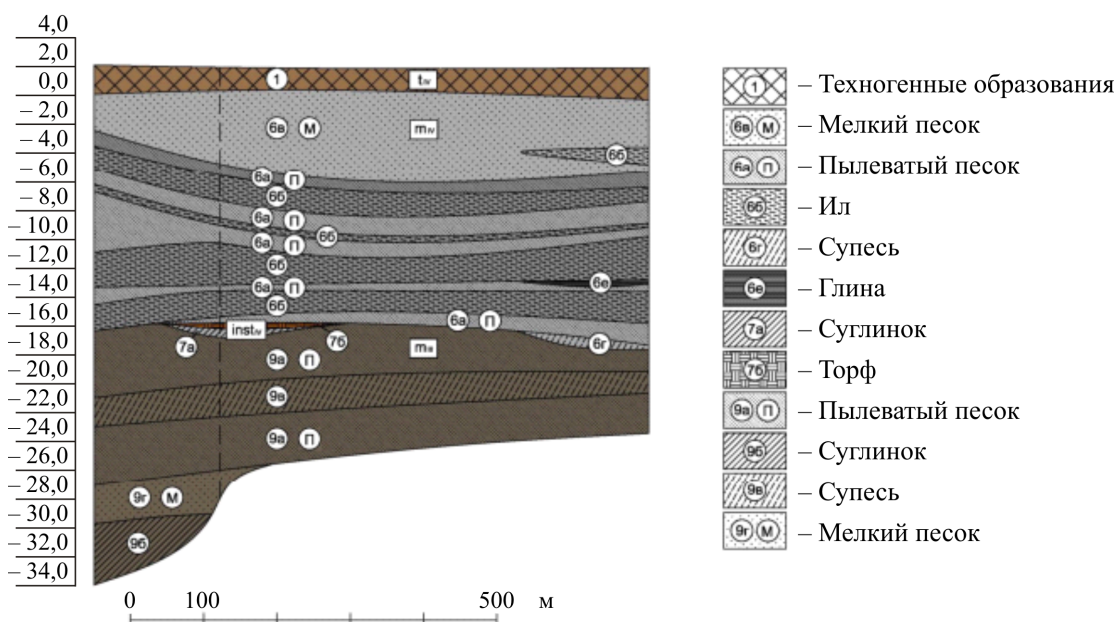


Рис. 2. Типичный инженерно-геологический разрез одного из участков строительства  
 Fig. 2. Typical engineering-geological section of one of the construction sites

Характерные значения физических и деформационно-прочностных свойств илов в районе исследований приведены в табл. 1 и 2.

Следует сказать, что из-за проблем с отбором образцов ненарушенной структуры и больших затрат на длительные компрессионные испытания изыскательские организации в последнее время редко проводят экспериментальное определение характеристик сжимаемости илов, назначая их по справочной литературе или архивным данным, хотя даже на одной строительной площадке свойства этих неоднородных грунтов варьируют как по глубине, так и в плане в весьма широком интервале.

Таблица 1

Физические свойства илов

Table 1

Physical properties of the soft clayey soils

Разновидность ила	$\rho_s, \text{г/см}^3$	$\rho, \text{г/см}^3$	$e_0$	$W$	$W_L$	$W_P$	$I_p$
Супесчаный	2,69–2,75	1,63–1,94	0,74–1,23	0,24–0,36	0,20–0,34	0,21–0,25	0,05–0,06
Суглинистый	2,65–2,75	1,45–1,90	0,68–2,26	0,31–0,76	0,36–0,52	0,22–0,37	0,09–0,17
Глинистый	2,70–2,73	1,64–1,78	1,14–1,73	0,40–0,89	0,44–0,74	0,27–0,47	0,17–0,29

Таблица 2

Деформационно-прочностные свойства илов

Table 2

Strength and deformation characteristics of the soft clayey soils

Разновидность ила	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль деформации, МПа	
			компрессионный	одометрический
Супесчаный	3–10	15–18	1,6–4,4	2,2–5,9
Суглинистый	6–13	6–16	0,7–2,9	1,2–4,7
Глинистый	8–18	7–13	0,9–3,3	1,5–5,3

В зарубежной практике геотехнического проектирования находят применение многочисленные эмпирические зависимости характеристик сжимаемости слабых глинистых грунтов от их физических свойств и классификационных показателей, например от природной влажности, начального коэффициента пористости, удельного веса грунта, показателей пластичности и текучести, а также различных их комбинаций (см. [12–18]).

Указанные зависимости, конечно, являются региональными и применимы лишь для определенного района исследований, что обусловлено особенностями генезиса, состава грунтов, условиями их залегания и др. В качестве характеристики сжимаемости используется обычно индекс компрессии (см. [19–21]; СТО 36554501-067-2021):

$$c_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma} = \frac{e_1 - e_2}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}, \quad (1)$$

где  $\Delta e$  – изменение коэффициента пористости;  $\Delta \lg \sigma$  – изменение логарифма вертикальных сжимающих напряжений.

Целью настоящих исследований было изучение зависимости индекса компрессии илов, залегающих на побережье Белого моря, от исходных значений влажности и коэффициента пористости.

Выбор в качестве объекта исследований указанной характеристики сжимаемости вместо традиционно применяемого в отечественной практике модуля деформации обусловлен двумя причинами. Первой послужило широкое распространение в геотехническом проектировании зарубежных программ, использующих именно индекс компрессии. Второй стало обеспечение возможности сопоставления получаемых результатов с имеющимися многочисленными литературными данными.

В конце статьи дан пример расчета одометрического модуля деформации с использованием полученных зависимостей.

### Методика исследований и исходные характеристики грунтов

Исследования выполнялись на компрессионно-фильтрационных приборах. Всего было испытано 14 образцов илов, отобранных на глубине 12,3–18,8 м. Площадь поперечного сечения образцов составляла  $60 \text{ см}^2$ , высота 3 см. Продолжительность испытаний достигала 13–14 недель. В общую выборку включены также данные испытаний 45 образцов трех типов илов – супесчаных, суглинистых и глинистых, проводившихся АрхТИСИзом с 1970-х гг. по настоящее время.

Графики гранулометрического состава исследованных илов представлены на рис. 3. Содержание частиц размером  $d < 0,05 \text{ мм}$  в илах трех типов составляет: супесчаных – 20–30 %, суглинистых – 30–40 %, глинистых – 50–60 %.

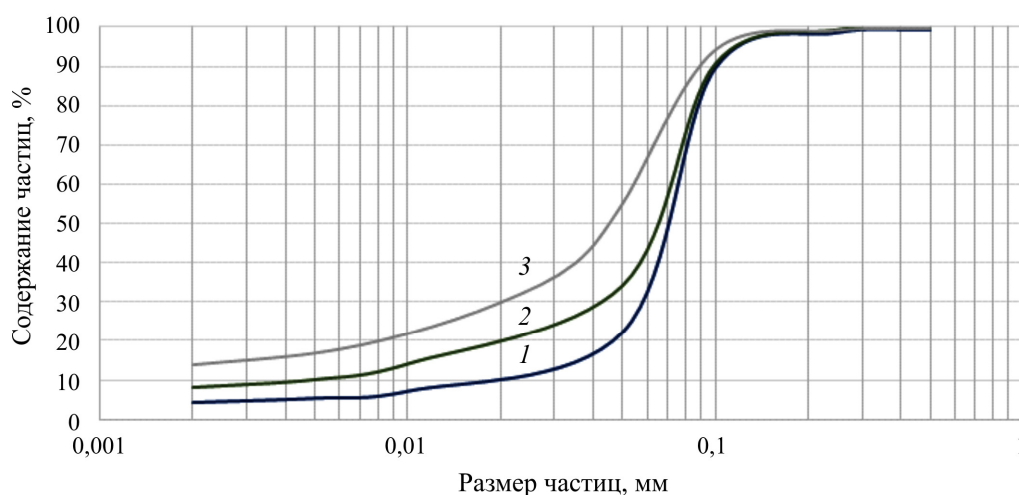


Рис. 3. Гранулометрический состав илов: 1 – супесчаного; 2 – суглинистого; 3 – глинистого

Fig. 3. Grain size distribution of soft clayey soils samples content of particles  $d < 0,05 \text{ mm}$ :

1 – 20–30 %; 2 – 30–40 %; 3 – 50–60 %

На рис. 4 приведена корреляционная зависимость между природной влажностью образцов  $W$  и начальным коэффициентом пористости  $e_0$ . Как видим, значительно правее линии  $W_{sat}$ , соответствующей полному водонасыщению образцов, оказались две точки. Данные компрессионных испытаний этих образцов исключены из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся в выборке образцы имели степень водонасыщения  $S_r = 0,75–1,00$ .

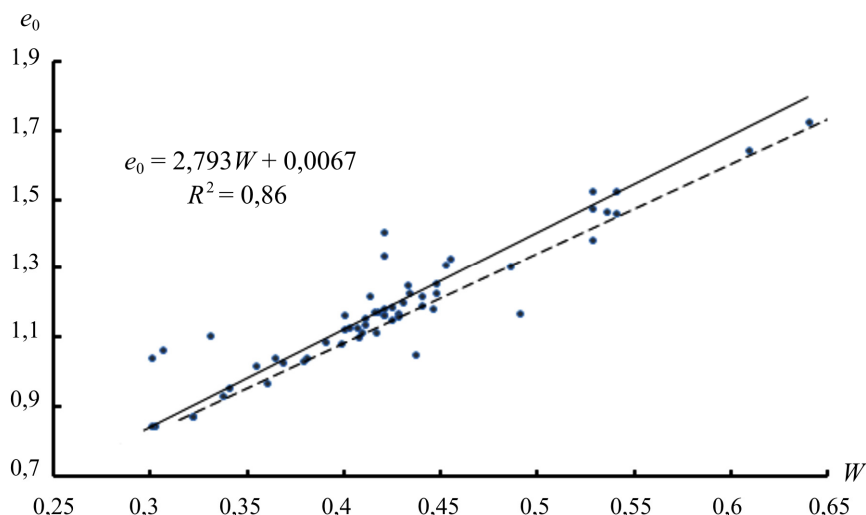


Рис. 4. Зависимость начального коэффициента пористости от влажности (сплошная линия).

Пунктиром показано предельное значение влажности при полном насыщении  $W_{sat}$

Fig. 4. Relationship between the compression index and the natural water content (solid line).

Limit natural water content at complete water saturation indicated by a dotted line

## Результаты компрессионных испытаний

Результаты компрессионных испытаний представлялись в полулогарифмических координатах – зависимостями коэффициента пористости от логарифма напряжений  $e = f(\lg \sigma)$ . Для всех образцов искомые зависимости оказались линейными и статистически значимыми с весьма высокой теснотой связи (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,90–0,99$ ). Несколько характерных графиков по результатам испытаний образцов с крайними и промежуточными значениями начального коэффициента пористости для трех разновидностей илов приведены на рис. 5.

Индекс компрессии, равный тангенсу угла наклона графиков к оси абсцисс, варьирует для трех разновидностей илов в следующих интервалах: супесчаных 0,067–0,087, суглинистых 0,072–0,332, глинистых 0,109–0,439. В результате обработки сформированной базы данных были получены линейные зависимости индекса компрессии от исходных значений коэффициента пористости и влажности образцов грунта с весьма высокими коэффициентами детерминации (рис. 6):

$$c_c = 0,351e_0 - 0,226, R^2 = 0,75; \quad (2)$$

$$c_c = 0,896W - 0,188, R^2 = 0,73, \quad (3)$$

где  $e_0$  – начальный коэффициент пористости;  $W$  – природная влажность;  $R^2$  – коэффициент детерминации.

Заметим, что полученные зависимости являются общими для всех трех разновидностей илов (рис. 6).

Полученными зависимостями можно пользоваться для определения индекса компрессии. Конечно, большее практическое значение имеет зависимость (3), так как определение влажности возможно на образцах нарушенной структуры, отбираемых при проходке скважины, например шнеком, тогда как коэффициент пористости можно определить лишь на образцах ненарушенной структуры, отбираемых грунтоносом.



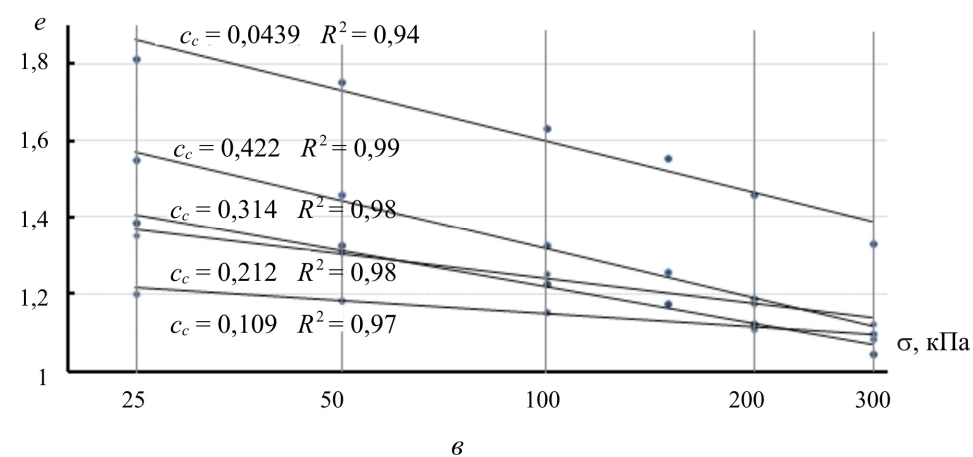
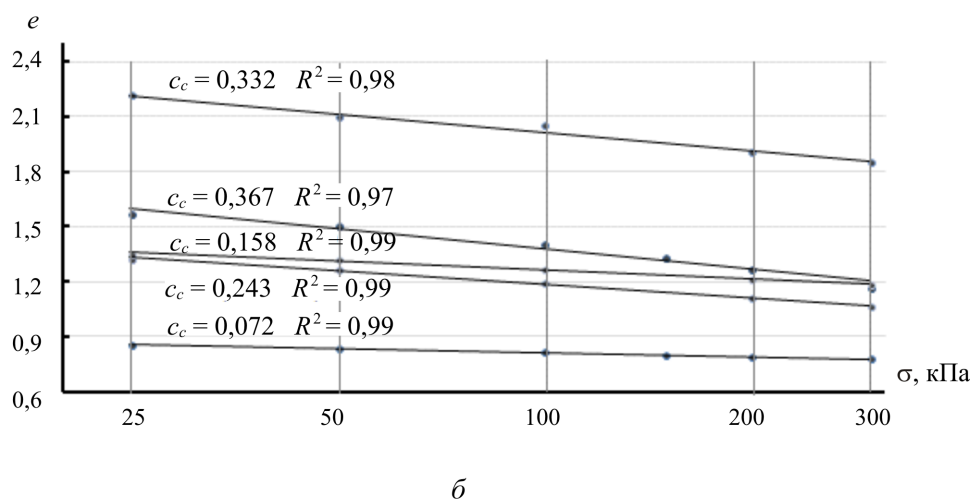
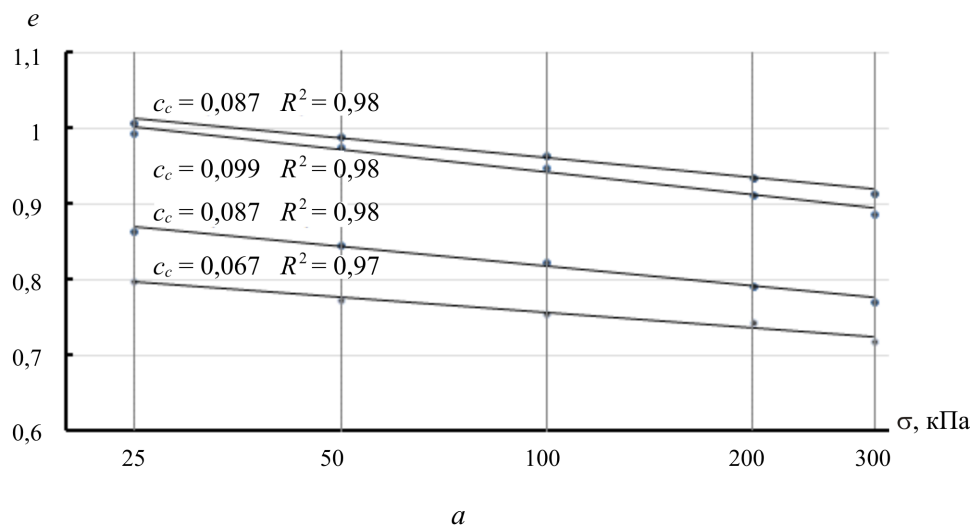


Рис. 5. Характерные компрессионные зависимости трех типов илов:  
*a* – супесчаного; *б* – суглинистого; *в* – глинистого

Fig. 5. Compression dependencies from oedometer tests for three types of soft soils samples  
 content of particles  $d < 0,05$  mm: *a* – 20–30 %; *б* – 30–40 %; *в* – 50–60 %

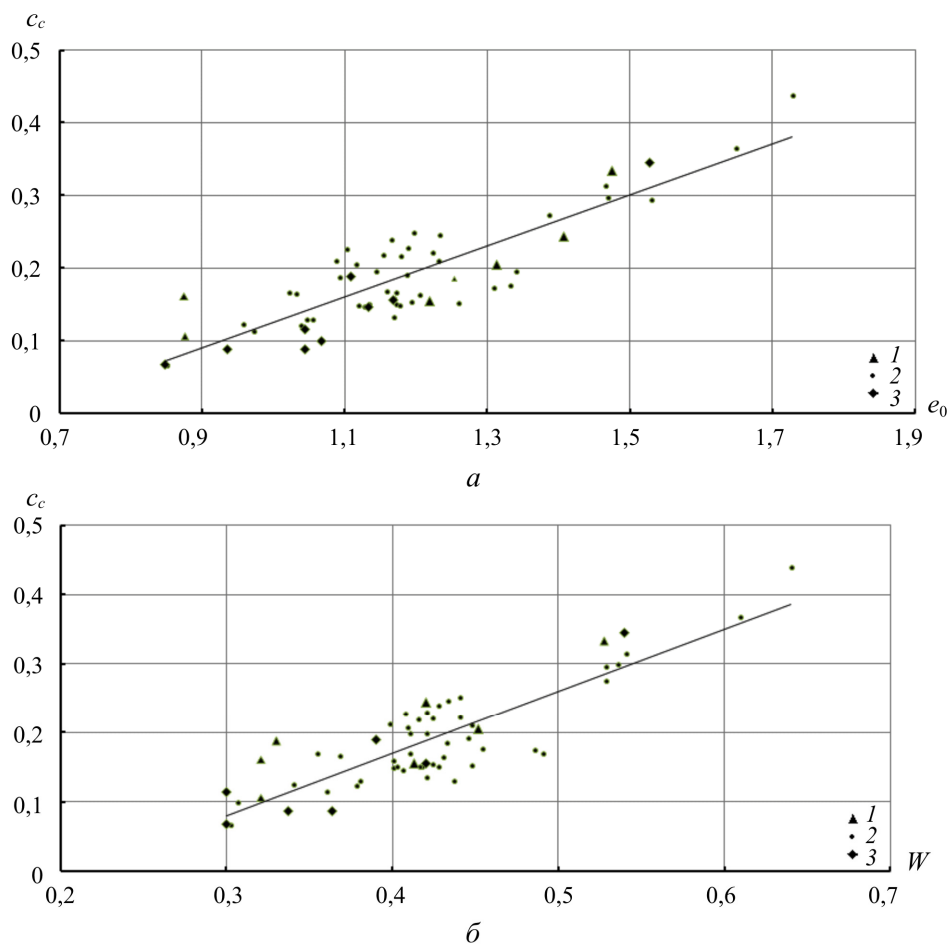


Рис. 6. Зависимости индекса компрессии от исходных значений коэффициента пористости ( $a$ ) и влажности ( $b$ ) илов: 1 – супесчаных, 2 – суглинистых, 3 – глинистых  
 Fig. 6. Relationship between the compression index and an initial void ratio ( $a$ ), a natural water content ( $b$ ), of soft clayey soils samples content of particles  $d < 0,05$  mm:  
 $a$  – 20–30 %;  $b$  – 30–40 %;  $c$  – 50–60 %

## Анализ результатов исследований

Как отмечалось выше, различными авторами были получены многочисленные эмпирические зависимости индекса компрессии подобных сильнодеформируемых глинистых грунтов от их физических свойств. Большинство авторов (табл. 3) предлагают линейные зависимости, аналогичные тем, что получены в наших исследованиях:

$$c_c = ke_0 + b, \quad (4)$$

$$c_c = mW + d. \quad (5)$$

Значения параметров в приведенных зависимостях изменяются в довольно широких интервалах:  $k = 0,012–0,75$  и  $b = -0,375–0,260$ ;  $m = 0,660–1,404$  и  $d = -0,318–0,118$ .

Сопоставлять дифференцированно значения каждого из параметров приведенных линейных зависимостей не имеет большого смысла, так как они являются взаимозависимыми – при изменении, например коэффициента  $m$  изменяется и величина  $b$ . Воспользуемся методом, предложенным А. Al-Khafaji с соавторами [34]. Они сопоставляли данные своих и предшествующих исследований путем построения зависимости  $b = f(k)$ .



Таблица 3

Обзор эмпирических зависимостей индекса компрессии от начального коэффициента пористости и природной влажности

Table 3

The review of empirical dependencies the compression index on an initial void ratio and a natural water content

Коэффициенты эмпирических зависимостей (4) и (5)				Авторы
$k$	$b$	$m$	$d$	
0,540	-0,189	1,404	-0,189	Y.A. Nishida [ <sup>1*</sup> ]
0,290	-0,078	1,020	-0,093	B.K. Hough [ <sup>2*</sup> ]
0,350	-0,175	-	-	B.K. Hough [ <sup>3*</sup> ]
-	-	1,150	0	P. Moran & Rutledge [ <sup>2*</sup> ]
0,430	-0,105	-	-	V.M. Cozzolino [ <sup>2*</sup> ]
0,430	0,139	-	-	V.M. Cozzolino [ <sup>3*</sup> ]
0,750	-0,375	-	-	G.B. Sowers [ <sup>1*</sup> ]
-	-	1,000	0	J.O. Osterberg [ <sup>2*</sup> ]
0,400	-0,100	1,000	-0,050	A.S. Azzouz et. al. [ <sup>4*</sup> ]
0,156	0,011	1,150	0	J.E. Bowles [ <sup>3*</sup> ]
0,208	0,008	-	-	J.E. Bowles [ <sup>2*</sup> ]
0,300	-0,081	1,000	-0,075	O.R. Herrero [ <sup>4*</sup> ]
-	-	1,000	0	S.D. Koppula [ <sup>3*</sup> ]
-	-	1,020	-0,093	M. Serajuddin [ <sup>1*</sup> ]
-	-	0,660	0	F.M. Abdrabbo & M.A. Mahmoud [ <sup>1*</sup> ]
0,330	-0,116	-	-	M. Amin et al. [ <sup>1*</sup> ]
0,198	0,035	-	-	S.S. Razouk & H.N. Isam [ <sup>5*</sup> ]
0,400	-0,100	1,200	-0,100	M.A. Lav & A.M. Ansal [ <sup>6*</sup> ]
0,540	-0,200	1,300	-0,050	G.L. Yoon & B.T. Kim [25; 27]
0,297	-0,001	-	-	Y.M. Zhao et al. [ <sup>7*</sup> ]
0,012	0,003	-	-	J.H. Park & T. Koumoto [28]
-	-	1,340	-0,048	E.Y.N. Oh & G.W.K. Chai [4]
0,365	-0,042	0,910	0,052	C.H. Solanki & M.D. Desai [ <sup>6*</sup> ]
0,288	-0,146	0,720	-0,091	P.Vinod & J. Bindu [ <sup>6*</sup> ]
0,490	-0,110	1,300	-0,115	H.I. Park & S.R. Lee [ <sup>4*</sup> ]
0,124	0,260	-	-	A. Kifae et al. [28]
-	-	0,850	-0,009	A. Drevininkas et al. [30]
0,361	0,071	0,740	-0,007	F. Kalantary & K. Afshin [ <sup>2*</sup> ]
0,522	-0,104	1,020	0,118	S.Widodo & I.Abdelazim [31]
0,679	-0,193	1,360	0,016	P.T. Sari & Y.K. Firmansyah [16]
0,196	0,207	1,000	0,027	S.M.M. Dway & D.A.A. Thant [32]
-	-	1,400	-0,318	A. Bryan et al. [ <sup>2*</sup> ]
0,348	0,087	1,000	0,082	Y.B. Gao et al. [ <sup>7*</sup> ]
-	-	1,100	-0,083	G. Li et al. [14]
0,287	-0,015	-	-	M. Farzi [ <sup>4*</sup> ]
0,377	-0,042	1,200	-0,060	N.M.K.N. Hassan [2]
0,295	-0,062	-	-	B.A. Васенин [33]
0,493	-0,323	-	-	C. Huang et al. [3]

Примечание: [<sup>1\*</sup>] – принято по обзору [22]; [<sup>2\*</sup>] – принято по обзору [23]; [<sup>3\*</sup>] – принято по обзору [5]; [<sup>4\*</sup>] – принято по обзору [24]; [<sup>5\*</sup>] – принято по обзору [25]; [<sup>6\*</sup>] – принято по обзору [26]; [<sup>7\*</sup>] – принято по обзору [3].

На рис. 7 представлены точечные зависимости  $b = f(k)$  и  $m = f(d)$ , построенные по данным, содержащимся в табл. 3. Треугольным маркером показаны точки с координатами (0,351; -0,226) и (0,896; -0,188), соответствующие зависимостям (2) и (3) для исследуемых илов. Как видим, полученные нами значения параметров являются характерными для аналогичных слабых глинистых грунтов, но находятся на нижней границе точечных графиков. Индекс компрессии исследованных илов в 1,5–2 раза меньше средних значений, найденных по литературным данным.

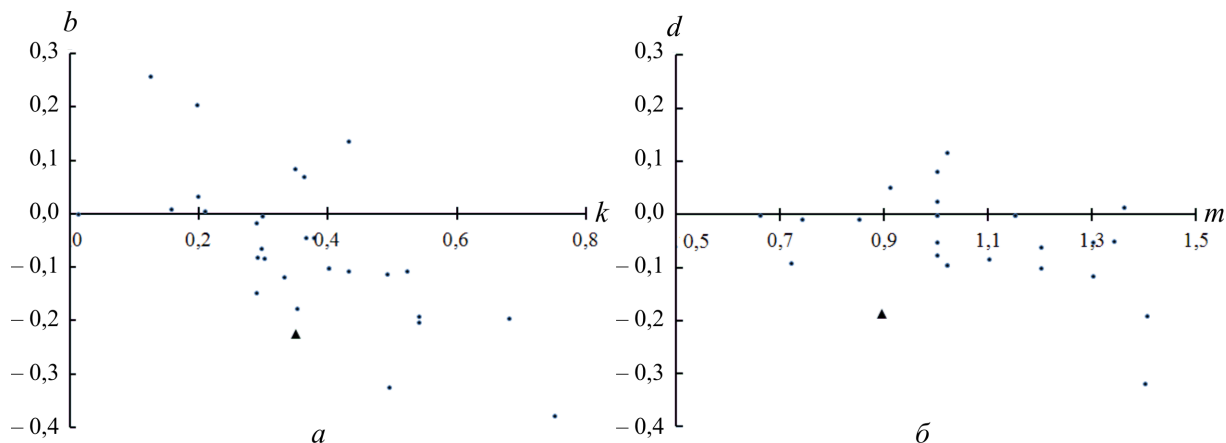


Рис. 7. Коэффициенты линейных зависимостей индекса компрессии от начального коэффициента пористости (а) и природной влажности (б). Треугольным маркером показаны значения, полученные авторами

Fig. 7. Coefficients of linear dependencies of the compression index on an initial void ratio (a) and a natural water content (b). The values obtained by the authors are shown with a triangular marker

Согласно последней версии СП 22.13330.2016 в расчете осадки основания в качестве характеристики сжимаемости грунтов в различных случаях могут использоваться два одометрических модуля деформации – секущий ( $E_{oed}$ ) и касательный ( $E_{oed}^k$ ). Первый из них вычисляется в интервале напряжений от 100 до 200 кПа, второй определяется по наклону касательной к компрессионной кривой в точке, соответствующей величине вертикальных эффективных напряжений  $\sigma_{zg}$ . Указанные величины могут быть найдены через индекс компрессии [18]:

$$E_{oed} = \frac{(1 + e_r) \cdot (200 - 100)}{c_c \cdot \lg\left(\frac{200}{100}\right)} = \frac{100(1 + e_r)}{c_c \lg 2}, \quad (6)$$

$$E_{oed}^k = \frac{2,3(1 + e_r)}{c_c} \sigma_{zg}, \quad (7)$$

где  $e_r$  – коэффициент пористости грунта при так называемом опорном давлении 100 кПа в первой формуле и  $\sigma_{zg}$  – во второй.

Из-за большой сжимаемости илов использование начального коэффициента пористости вместо  $e_r$  вносит погрешность в вычисления модулей деформации. Анализ компрессионных зависимостей показал, что для илов района исследований можно задавать: при 50 кПа  $e_r = e_0 - 0,07$ , при 100 кПа  $e_r = e_0 - 0,14$ . Для промежуточных значений напряжений  $e_r$  следует определять интерполяцией.

*Пример расчета.* Образцы ила отобраны на глубине, где напряжения от собственного веса грунта с учетом взвешивающего действия воды составляют  $\sigma_{zg} = 100$  кПа. Природная влажность грунта  $W = 0,55$ . Требуется вычислить секущий и касательный одометрический модули деформации.

Последовательно находим:

$$e_0 = 2,793W + 0,0067 = 2,793 \cdot 0,55 + 0,0067 = 1,543;$$

$$e_r = 1,543 - 0,14 = 1,403;$$

$$c_c = 0,896W - 0,188 = 0,896 \cdot 0,55 - 0,188 = 0,305;$$

$$E_{oed} = \frac{100(1+e_r)}{c_c \lg 2} = \frac{100(1+1,403)}{0,305 \cdot \lg 2} = 2617;$$

$$E_{oed}^k = \frac{2,3(1+e_r)}{c_c} \sigma_{zg} = \frac{2,3(1+1,403)}{0,305} \cdot 100 = 1812.$$

Полученные значения модулей деформации хорошо коррелируют с экспериментальными значениями, приведенными в табл. 2.

## Выводы

1. По результатам компрессионных испытаний илов, залегающих на побережье Белого моря на глубине 12–18 м, получены линейные зависимости индекса компрессии от исходных значений коэффициента пористости и влажности:  $c_c = 0,351e_0 - 0,226$  ( $R^2 = 0,75$ );  $c_c = 0,896W - 0,188$  ( $R^2 = 0,73$ ).

2. Анализ более 30 эмпирических зависимостей, полученных различными авторами, показал, что представленные в статье значения параметров являются характерными для слабых сильнодеформируемых глинистых грунтов морских побережий.

3. Полученные зависимости могут применяться в моделировании оснований с помощью получивших широкое распространение зарубежных программ или для вычисления модуля деформации илов для расчета осадки по традиционно применяемым методикам.

*Финансирование.* Исследование не имело спонсорской поддержки.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Вклад авторов.* Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi / M.W. Bo, A. Arulrajah, P. Sukmak, S. Horpibulsuk // Soils and Foundations. – 2015. – Vol. 55, no. 3. – P. 600–613.
2. Hassan N.M.K.N., Wahid S., Wahab M.T.A. Geotechnical and Minerology Properties of Marine Clay at the Northeast of Penang Island // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 203, no. 04005. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820304005>

3. Assessment of empirical equations of the compression index of muddy clay: sensitivity to geographic locality / C. Huang, Q. Li, S. Wu, Y. Liu, J. Li // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12, no. 122. – P. 1–13. DOI: 10.1007/s12517-019-4276-5

4. Characterization of Marine Clay for Road Embankment Design in Coastal Area // *The Proceedings of The Sixteenth International offshore and polar engineering conference*. 28 May – 2 June. – San Francisco, California, USA, 2006. – P. 560–564.

5. Onyejekwe S., Kang X., Ge L. Assessment of empirical equations for the compression index of fine-grained soils in Missouri // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2015. – Vol. 74, no. 3. – P. 705–716. DOI: 10.1007/s10064-014-0659-8

6. Compressibility and consolidation properties of Santos soft clay near Barnabé Island / V.N. Aguiar, M.S. Andrade, I.S.M. Martins, J.P.P. Rémy, P.E. Lima // *Soils and Rocks*. – 2021. – Vol. 44, no. 4. – P. 1–18. DOI: 10.28927/SR.2021.074821

7. Faisal M. Marine soft clays of Santos, Brazil: Building settlements and geological history // *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12–16 September. – Osaka, Japan. – 2006. – P. 405–408.

8. Ледяев С.В. Неоднородные грунтовые напластования с промежуточным слабым слоем как основания фундаментов мелкого заложения: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1992. – 178 с.

9. Улицкий В.М. Технология реконструкции фундаментов на слабых грунтах: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1993. – 316 с.

10. Хотяков В.Я. Работа свай и ленточных свайных фундаментов в верхнем несущем слое слоистого основания: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1983. – 217 с.

11. Васенин В.А., Шашкин А.Г. Осадки зданий на слабых глинистых грунтах (на примере застройки Санкт-Петербурга) // *Геотехника*. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 32–44.

12. Abasi N. A New Empirical Equation for Compression Behavior of Unconsolidated Clayey Soils // *Journal of civil engineering*. – 2013. – Vol. 24, no 2. – P. 41–56. DOI: 10.17656/sjes.10061

13. Using empirical correlations and artificial neural network to estimate compressibility of low plasticity clays / D. Akbarimehr, A. Eslami, E. Aflaki, R. Imam // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – Vol. 13, no. 1225. DOI: 10.1007/s12517-020-06228-3

14. Li G., Zhang J.-l., Yang O. Probabilistically statistical analysis on physico-mechanical indices for sediment soils // *Rock and Soil Mechanics*. – 2017. – Vol. 38, no. 12. – P. 3565–3572. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.022

15. Salih N. Geotechnical characteristics correlations for fine-grained soils // *4th International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering*, 7–9 October. – Istanbul, Turkey. – 2019. – Vol. 737, no. 012099. – P. 1–12. DOI: 10.1088/1757-899X/737/1/012099

16. Sari P.T.K., Firmansyah Y.K. The Empirical Correlation Using Linear Regression of Compression Index for Surabaya Soft Soil // *Advance in Structural Engineering and Mechanic*, 8–12 September. – Jeju, Korea. – 2013. – P. 3008–3019.

17. Kamal R., Nihad S., Tavga A. Correlation of Consistency and Compressibility Properties of Soils in Sulaimani City // *Sulaimani Journal for Engineering Sciences*. – 2017. – Vol. 4, no. 5. – P. 86–94. DOI: 10.17656/sjes.10061

18. Dhianty E., Mochtar I. Method of removing secondary compression on clay using preloading // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 195, no 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819503006>

19. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов: практ. курс / пер. с с франц. В.А. Барвашова; под ред. Б.И. Кулачкина. – М.: Стройиздат, 1981. – 455 с.
20. ASTM D2435/D2435 M-11. Standard test methods for one dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2020. – 14 p.
21. ASTM D4186/D4186 M-20e1. Standard test method for one dimensional consolidation properties of saturated cohesive soils using controlled-strain loading. ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2020. – 17 p.
22. Satyanarayana B., Reddy C.N.V. Satyanarayana. Development of Empirical Equation for Compressibility of Marine Clays // Indian Geotechnical Conference, 16–18 December. – Mumbai, India. – 2010. – P. 885–886.
23. Regional Normalized Empirical Correlations for the Compression Index (Cc) of Soil – A Critical Overview / C. Bogireddy, G. Sutar, C.H. Solanki, S.A. Vasanwala // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8, no. 12. – P. 77–88.
24. Prediction of Compression Index of Saturated Clays Using Robust Optimization Model / Y. Erzin, H.M. Abasi, A. Kordnaeij, S. Erzin // Journal of Soft Computing in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 4, no 3. – P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.22115/SCCE.2020.233075.1226>
25. Yoon G.L., Kim B.T, Jeon S.S. Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis // Canadian Geotechnical Journal. – 2004. – Vol. 41, no. 6. – P. 1213–1221. DOI: 10.1139/t04-057
26. Shimobe S., Spagnoli G. A General Overview on the Correlation of Compression Index of Clays with Some Geotechnical Index Properties // Geotechnical and Geological Engineering. – 2022. – Vol. 40. – P. 311–324. DOI: 10.1007/s10706-021-01888-8
27. Yoon G.L., Kim B.T. Regression Analysis of Compression Index for Kwangyang Marine Clay // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2006. – Vol. 10, no. 6. – P. 415–418. DOI: 10.1007/BF02823980
28. Park J.H., Koumoto T. New Compression Index Equation // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2004. – Vol. 130. – P. 223–226. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(223)
29. Kifae A., Hassan A., Shanbara H. Empirical Relationships Between Index Properties and Compression Indices of Clayey Soils in Al-Nasiriya City // Journal of University of Babylon, Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 26, no. 1. – P. 348–356.
30. Drevininkas A., Creer G., Nkemitag M. Comparison of consolidation characteristics from CPTu, DMT and laboratory testing at Ashbridges Bay, Toronto, Ontario [Электронный ресурс] // Pan – Am CGS Geotechnical Conference. – 2011. – Vol. 1, no. 6. – P. 48–65. – URL: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper180.pdf> (дата обращения: 16.03.2022).
31. Widodo S., Ibrahim A. Estimation of Primary Compression Index (Cc) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay // International Journal of Engineering Research and Applications. – 2012. – Vol. 2, no. 5. – P. 2232–2236.
32. Dway S.M.M., Thant D.A.A. Soil Compression Index Prediction Model for Clayey Soils // International Journal of Scientific Engineering and Technology Research. – 2014. – Vol. 3, no. 11. – P. 2458–2462.
33. Васенин В.А. Исследование компрессионной сжимаемости глинистых отложений для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Ч. 1. Статистическая оценка параметров деформируемости при компрессионном сжатии // Геотехника. – 2018. – Т. 10, № 5–6. – С. 18–33.

34. Al-Khafaji A., Maillacheruvu K., Jacobs R. Analysis of empirical compression index equations using the void ratio // The Ninth International Structural Engineering and Construction Conference, 24–29 July. – Valencia, Spain, 2017. – P. 1–6. DOI: 10.14455/isec.res.2017.63

## References

1. Bo M.W., Arulrajah A., Sukmak P., Horpibulsuk S. Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi. *Soils and Foundations*, 2015, vol. 55, no. 3. pp. 600-613.
2. Hassan N.M.K.N., Wahid S., Wahab M.T.A. Geotechnical and Minerology Properties of Marine Clay at the Northeast of Penang Island. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 203, no. 04005. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820304005>
3. Huang C., Li Q., Wu S., Liu Y., Li J. Assessment of empirical equations of the compression index of muddy clay: sensitivity to geographic locality. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, vol. 12, no. 122. pp. 1-13. DOI: 10.1007/s12517-019-4276-5
4. Oh E.Y.N., Chai G.W.K. Characterization of Marine Clay for Road Embankment Design in Coastal Area. *The Proceedings of The Sixteenth International offshore and polar engineering conference*, 28 May – 2 June, San Francisco, California, USA, 2006, pp. 560-564.
5. Onyejekwe S., Kang X., Ge L. Assessment of empirical equations for the compression index of fine-grained soils in Missouri. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, vol. 74, no. 3. pp. 705-716. DOI: 10.1007/s10064-014-0659-8
6. Aguiar V.N., Andrade M.S., Martins I.S.M., Rémy J.P.P., Lima P.E. Compressibility and consolidation properties of Santos soft clay near Barnabé Island. *Soils and Rocks*, 2021, vol. 44, no. 4. pp. 1-18. DOI: 10.28927/SR.2021.074821
7. Faisal M. Marine soft clays of Santos, Brazil: Building settlements and geological history. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12–16 September, Osaka, Japan, 2006, pp. 405-408.
8. Lediaev S.V. Neodnorodnye gruntovye naplastovaniia s promezhutochnym slabym sloem kak osnovaniia fundamentov melkogo [Heterogeneous soil strata with an intermediate weak layer as the foundations of shallow foundations]. Ph. D. thesis. Saint-Petersburg, 1992, 178 p.
9. Ulitskii V.M. Tekhnologiia rekonstruktsii fundamentov na slabyykh gruntakh [Technology of reconstruction of foundations on soft soils]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Saint-Petersburg, 1993, 316 p.
10. Khotiakov V.Ia. Rabota svai i lentochnykh svainykh fundamentov v verkhnem nesushchem sloe sloistogo osnovaniia [Piles and strip foundations works in the upper part of load-bearing the layer bases]. Ph. D. thesis. Leningrad, 1983, 217 p.
11. Vasenin V.A., Shashkin A.G. Osadki zdaniy na slabyykh glinistykh gruntakh (na primere zastroiki Sankt-Peterburga) [Settlements of buildings on soft clayey soils (on the example of development of Saint-Petersburg) ]. *Geotechnics*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 32-44.
12. Abasi N. A new empirical equation for compression behavior of unconsolidated clayey soils. *Journal of civil engineering*, 2013, vol. 24, no. 2, pp. 41-56. DOI: 10.17656/sjes.10061
13. Akbarimehr D., Eslami A., Aflaki E., Imam R. Using empirical correlations and artificial neural network to estimate compressibility of low plasticity clays. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, no. 1225. DOI: 10.1007/s12517-020-06228-3
14. Li G., Zhang J.-l., Yang O. Probabilistically statistical analysis on physico-mechanical indices for sediment soils. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, vol. 38, no. 12. pp. 3565-3572. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.022



15. Salih N. Geotechnical characteristics correlations for fine-grained soils. *4th International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering*, 7–9 October, Istanbul, Turkey, 2019, vol. 737, no. 012099. pp. 1-12. DOI: 10.1088/1757-899X/737/1/012099
16. Sari P.T. K., Firmansyah Y.K. The empirical correlation using linear regression of compression index for surabaya soft soil. *Advance in Structural Engineering and Mechanic*, 8–12 September, Jeju, Korea, 2013. pp. 3008-3019.
17. Kamal R., Nihad S., Tavga A. Correlation of consistency and compressibility properties of soils in Sulaimani City. *Sulaimani Journal for Engineering Sciences*, 2017, vol. 4, no. 5. pp. 86-94. DOI: 10.17656/sjes.10061
18. Dhianty E., Mochtar I. Method of removing secondary compression on clay using pre-loading. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 195, no. 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503006>
19. Koste Zh., Sanglera G. *Mekhanika gruntov [Soil Mechanics]*. Ed. B.I. Kulachkina, Moscow, Strojizdat, 1981, 455 p.
20. ASTM D2435/D2435 M-11. Standard test methods for one dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 14 p.
21. ASTM D4186/D4186 M-20e1. Standard test method for one dimensional consolidation properties of saturated cohesive soils using controlled-strain loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 17 p.
22. Satyanarayana B., Reddy C.N.V. Satyanarayana. Development of empirical equation for compressibility of marine clays. *Indian Geotechnical Conference*, 16–18 December, Mumbai, India, 2010, pp. 885-886.
23. Bogireddy C., Sutar G., Solanki C.H., Vasanwala S.A. Regional normalized empirical correlations for the compression index (Cc) of Soil – A Critical Overview. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, no. 12, pp. 77-88.
24. Erzin Y., Abasi H.M., Kordnaeij A., Erzin S. Prediction of compression index of saturated clays using robust optimization model. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 2020, vol. 4, no. 3. pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.22115/SCCE.2020.233075.1226>
25. Yoon G.L., Kim B.T, Jeon S.S. Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, vol. 41, no. 6. pp. 1213-1221. DOI: 10.1139/t04-057
26. Shimobe S., Spagnoli G. A General overview on the correlation of compression index of clays with some geotechnical index properties. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, vol. 40. pp. 311-324. DOI: 10.1007/s10706-021-01888-8
27. Yoon G.L., Kim B.T. Regression analysis of compression index for kwangyang marine clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2006, vol. 10, no. 6. pp. 415-418 DOI: 10.1007/BF02823980
28. Park J.H., Koumoto T. New compression index equation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2004, vol. 130, pp. 223-226. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(223).
29. Kifae A., Hassan A., Shanbara H. Empirical relationships between index properties and compression indices of clayey soils in Al-Nasiriya City. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*, 2018, vol. 26, no. 1. pp. 348-356.
30. Drevininkas A., Creer G., Nkemitag M. Comparison of consolidation characteristics from CPTu, DMT and laboratory testing at Ashbridges Bay, Toronto, Ontario. *Pan – Am CGS*

*Geotechnical Conference*, 2011, vol. 1, no. 6. pp. 48-65, available at: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper180.pdf> (accessed 16 March 2022).

31. Widodo S., Ibrahim A. Estimation of primary compression index (cc) using physical properties of pontianak soft clay. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, no. 5. pp. 2232-2236.

32. Dway S.M.M., Thant D.A.A. Soil compression index prediction model for clayey soils. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2014, vol. 03, no. 11. pp. 2458-2462.

33. Vasenin V.A. Issledovanie kompressionnoi szhimaemosti glinistyx otlozhenii dlia inzhenerno-geologicheskikh uslovii Sankt-Peterburga. Chast' 1. Statisticheskaja otsenka parametrov deformiruемости pri kompressionnom szhatii [Evaluation of clay deposits compression properties for geological conditions of Saint-Petersburg. Part 1. Statistical estimation of compression parameters]. *Geotechnics*, 2018, vol. 10, no. 5-6. pp. 18-33.

34. Al-Khafaji A., Maillacheruvu K., Jacobs R. Analysis of empirical compression index equations using the void ratio. *The Ninth International Structural Engineering and Construction Conference*, 24-29 July, Valencia, Spain, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.14455/ise.res.2017.63.