

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5282

УДК 674.81

Статья

Исследование взаимосвязей свойств почвогрунтов как опорных поверхностей движения лесных машин

Хитров Егор Германович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Просужих Алексей Анатольевич

старший преподаватель, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), prosuzhikh75@mail.ru

Рудов Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), 89213093250@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), ola.ola@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), silver73@inbox.ru

Получена: 26 мая 2020 / Принята: 24 июня 2020/ Опубликована: 28 июня 2020

Аннотация: В большинстве технологических процессов заготовки древесины используются колесные и гусеничные машины. Движители машин взаимодействуют с опорными поверхностями, почвами и грунтами лесосек; показатели их взаимодействия во многом определяют технологическую эффективность, производительность и энергоёмкость, а также экологическую безопасность операций лесосечных работ. Технологическая эффективность определяется проходимостью техники, грузоподъёмностью, скоростью ее движения по лесосеке, влияющими на производительность машин, а также расходом топлива при преодолении маршрута. Экологическая безопасность оценивается показателями повреждаемости напочвенного покрова, воздействия на корневую систему деревьев, уплотнения почвы и грунта, глубиной образующейся колеи, объемом выбросов продуктов сгорания в атмосферу, прямо связанным с расходом топлива. Ранее выполненные исследования показали, что тягово-сцепные свойства движителей и показатели их воздействия на опорные поверхности на практике могут оцениваться по соотношению фактического давления движителя и несущей способности опорной

поверхности. Давление движителя на опорную поверхность связано с параметрами движителя, а также деформативными и прочностными свойствами опорных поверхностей, основными из которых являются модуль общей деформации и несущая способность. Ранее было установлено, что эти характеристики могут определяться в полевых условиях при помощи зондирования лесного почвогрунта ручным конусным пенетрометром. Результаты исследования легли в основу методики оперативного контроля свойств лесного почвогрунта. Зададимся целью развить методику, получив оценки связей модуля деформации, несущей способности и конусного индекса различных опорных поверхностей, а также дополнив ее зависимостями для оценки деформативных и прочностных свойств опорных поверхностей по физическим свойствам (влажность, плотность, консистенция, пористость).

Ключевые слова: лесные почвогрунты, уплотнение, колесобразование, лесные машины, лесозаготовки

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5282

Article

Research of interrelations of soil properties as supporting surfaces for forest machinery movement

Egor Hitrov

PhD in engineering, associate professor, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Aleksej Prosuzhik

senior lecturer, Ukhta state technical University (Russian Federation), prosuzhikh75@mail.ru

Sergej Rudov

PhD in engineering, senior lecturer, Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), 89213093250@mail.ru

Olga Kunickaya

Doctor of engineering, professor, Yakut state agricultural Academy (Russian Federation), ola.ola@mail.ru

Igor Grigorev

Doctor of engineering, professor, Yakut state agricultural Academy (Russian Federation), silver73@inbox.ru

Received: 26 May 2020 / Accepted: 24 June 2020 / Published: 28 June 2020

Abstract: Wheeled and tracked vehicles are used in most technological processes of timber harvesting. The wheel and track units of machines interact with the support surfaces and soils of logging areas; the indicators of their interaction largely determine the technological efficiency, productivity and energy intensity, as well as the environmental safety of logging operations. Technological efficiency is determined by the passability of equipment, load capacity, speed of its movement through the cutting area, which affect the performance of machines, as well as fuel consumption during the route traffic. Environmental safety is assessed by indicators of damage to the ground cover, impact on the root system of trees, compaction of soil, the depth of the formed track, the volume of emissions of combustion products into the atmosphere, directly related to fuel consumption. Previous studies have shown that the traction properties of wheel and track units and their impact on the support surfaces in practice can be estimated by the ratio of the actual pressure of the wheel and track units and the bearing capacity of the support surface. The pressure of the wheel and track units on the support surface is related to the parameters of the propeller, as well as the stress-related and strength properties of the deformable soil, the main of which are the modulus of general deformation and load-bearing capacity. Previously, it was found that these characteristics could be determined in the field by probing the forest soil with a manual cone penetrometer. The results of the study formed the basis for the method of operational control of forest soil properties. The goal is to develop the method by obtaining

estimates of the relationship of the modulus of deformation, bearing capacity and cone index of various support surfaces, as well as by adding dependencies for evaluating the stress-related and strength properties of support surfaces by physical properties (humidity, density, consistency, porosity) and functions.

Keywords: forest soils, compaction, rutting, forest machines, logging

1. Введение

Обоснование и подбор параметров движителей машин, при которых обеспечивается должная производительность технологии и сохранение лесной экосистемы, является актуальной областью исследований в науке о лесозаготовительном производстве, что отмечается в работах ведущих учёных [1—9]. Научные сведения по показателям взаимодействия техники с опорными поверхностями необходимы не только для синтеза эффективных, средоохраняющих технологических процессов лесосечных работ, но и для проектирования перспективных образцов колёсных и гусеничных машин, предназначенных для эксплуатации в сложных (лесные почвогрунты, значительно деформируемые движителями) и особо сложных (увлажнённые и переувлажнённые, заболоченные грунты и почвогрунты, глубокий снег) почвенно-грунтовых и рельефных условиях нашей страны. Это особенно актуально в свете стратегии замещения импортной лесной техники отечественной.

Для разработки и реализации математических моделей процессов взаимодействия движителей лесозаготовительной техники с опорными поверхностями необходимо располагать сведениями об их физико-механических и прочностных свойствах.

2. Материалы и методы

В. В. Ларин [10] обобщил обширные статистические данные по физико-механическим свойствам неорганических грунтов и предложил формулы для определения модуля деформации E , удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ грунта по индексу водонасыщения I_W (для песчаных грунтов), индексу консистенции I_L (для супесей, суглинков и глин) и коэффициенту пористости e :

$$E = (A_{aE} + B_{aE} I_L) \cdot e^{A_{bE} + B_{bE} I_L}, \quad (1)$$

$$E = (A_{aE} + B_{aE} I_W) \cdot e^{A_{bE} + B_{bE} I_W}, \quad (2)$$

$$C = (A_{aC} + B_{aC} I_L) \cdot e^{A_{bC} + B_{bC} I_L}, \quad (3)$$

$$C = (A_{aC} + B_{aC} I_W) \cdot e^{A_{bC} + B_{bC} I_W}, \quad (4)$$

$$\varphi = (A_{a\varphi} + B_{a\varphi} I_L) \cdot e^{A_{b\varphi} + B_{b\varphi} I_L}, \quad (5)$$

$$\varphi = (A_{a\varphi} + B_{a\varphi} I_W) \cdot e^{A_{b\varphi} + B_{b\varphi} I_W}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов A , B в уравнениях (1)—(6) приведены в таблице 1. Обратим внимание на размерности величин E , C , φ , получаемых расчётным путём, которые соответствуют указанным в таблице 1.

Индекс водонасыщения песчаных грунтов определяется по формуле

$$I_W = \frac{W}{100} \frac{\rho_u}{e}, \quad (7)$$

где ρ_u — плотность частиц грунта [г/см^3], W — весовая влажность грунта, %.

Таблица 1. Коэффициенты в уравнениях для расчёта модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения [10]

Table 1. The coefficients in the equations for calculating the modulus of deformation, specific adhesion and angle of internal friction [10]

Показатель, размерность	Грунт	Коэффициент			
		$A_{a\varphi}$	$B_{a\varphi}$	$A_{b\varphi}$	$B_{b\varphi}$
$\varphi, ^\circ$	Песок крупнозернистый	32,535	0	-0,33	0
	Песок среднезернистый	24,746	0	-0,978	0
	Песок мелкозернистый	24,819	-0,042	-0,565	0,012
	Песок пылеватый	29,578	-2,832	-0,544	0,062
	Супесь	22,496	-7,808	-0,39	-0,25
	Суглинок	21,128	-11,79	-0,315	-0,722
	Глина	16,887	-11,98	-0,204	-2,506
C, МПа	Грунт	A_{aC}	B_{aC}	A_{bC}	B_{bC}
	Песок крупнозернистый	0,264	0	-2,784	0
	Песок среднезернистый	0,595	0	-2,126	0
	Песок мелкозернистый	0,707	0,001	-2,46	-0,123
	Песок пылеватый	1,951	-1,302	-1,788	-0,82
	Супесь	4,586	-3,775	-1,475	-1,118
	Суглинок	19,239	-14,37	1,204	-0,647
	Глина	42,573	-19,66	-1,136	-0,22
E, МПа	Грунт	A_{aE}	B_{aE}	A_{bE}	B_{bE}
	Песок крупнозернистый	18,112	0	-1,288	0
	Песок среднезернистый	17,851	0	-1,291	0
	Песок мелкозернистый	14,746	-3,694	-1,543	-0,071
	Песок пылеватый	8,332	-2,282	-2,07	0,364
	Супесь	10,67	-7,273	-1,524	-0,974
	Суглинок	11,366	-7,575	-1,403	-1,089
	Глина	15,217	-10,68	-0,969	-1,975

Индекс консистенции супеси, суглинка и глины определяется по формуле

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}, \quad (8)$$

где W_p — влажность грунта на границе пластичности, I_p — число пластичности:

$$I_p = W_L - W_p. \quad (9)$$

Плотность неорганического грунта ρ [г/см³] выражается через ρ_u , W , e по формуле

$$\rho = \rho_u \frac{1 + 0,01W}{1 + e}. \quad (10)$$

В таблице 2 приведены сведения о классификации грунтов по плотности.

Таблица 2. Классификация грунтов по плотности

Table 2. Classification of soils by density

Тип грунта	Характеристика плотности		
	Плотный	Средней плотности	Рыхлый
Песок крупнозернистый	< 0,55	0,55—0,7	> 0,7
Песок среднезернистый	< 0,55	0,55—0,7	> 0,7
Песок мелкозернистый	< 0,6	0,6—0,75	> 0,75
Песок пылеватый	< 0,6	0,6—0,8	> 0,8
Супесь	< 0,5	0,5—1	> 1,0
Суглинок	< 0,5	0,5—1	> 1,0
Глина	< 0,5	0,5—1	> 1,0

В таблице 3 приведены сведения о классификации связных грунтов по агрегатному состоянию.

Таблица 3. Индекс консистенции связных грунтов в различном агрегатном состоянии

Table 3. Index of the consistency of cohesive soils in various aggregate states

Характеристика агрегатного состояния грунта	Супесь	Глина и суглинок
Твёрдый	< 0	< 0
Полутвёрдый	< 0	0—0,25
Тугопластичный	< 0	0,25—0,50
Пластичный	0,0—1,0	0,25—0,50
Мягкопластичный	0,0—1,0	0,50—0,75
Текучепластичный	0,0—1,0	0,75—1,0
Текучий	> 1,0	> 1,0

Песчаные грунты классифицируют по влажности на три группы: маловлажные с индексом $I_w \leq 0,5$, влажные при $0,5 \leq I_w \leq 0,8$, влагонасыщенные при $I_w \geq 0,8$.

Для снега были получены уравнения, выражающие E , C , φ (размерности, как и ранее) через плотность ρ [г/см³]:

$$E = a_{\rho E} \rho^{b_{\rho E}}, \quad (11)$$

$$C = a_{\rho C} \rho^{b_{\rho C}}, \quad (12)$$

$$\varphi = a_{\rho \varphi} \rho^{b_{\rho \varphi}}. \quad (13)$$

Значения коэффициентов a , b в формулах (11)—(13) зависят от температуры снега, в таблице 4 они приведены для температуры $-3 \dots -20$ °С.

Таблица 4. Коэффициенты для расчёта модуля деформации, удельного сцепления, угла внутреннего трения снега и предельного нормального давления [10]

Table 4. Coefficients for calculating the modulus of deformation, specific adhesion, internal friction angle of snow, and maximum normal pressure [10]

Коэффициент	$a_{\rho \varphi}$	$b_{\rho \varphi}$	$a_{\rho C}$	$b_{\rho C}$	$a_{\rho E}$	$b_{\rho E}$
Значение	29,0	0,253	0,00213	3,09	34,2	2,51

Было показано, что значения C [МПа], φ [°], ρ [г/см³] лесного почвогрунта с высокой точностью можно выразить через модуль общей деформации E [МПа]:

$$C = a_{1EC} E^{b_{1EC}}, \quad (14)$$

$$\varphi = a_{1E\varphi} E^{b_{1E\varphi}}, \quad (15)$$

$$\rho = a_{1E\rho} E^{b_{1E\rho}}. \quad (16)$$

Числовые значения коэффициентов в уравнениях (14)—(16) представлены в таблице 5.

Таблица 5. Коэффициенты для расчёта удельного сцепления, угла внутреннего трения и плотности лесного почвогрунта по модулю деформации

Table 5. Coefficients for calculating the specific adhesion, internal friction angle and density of forest soil modulus of deformation

Коэффициент	$a_{1E\varphi}$	$b_{1E\varphi}$	a_{1EC}	b_{1EC}	$a_{1E\rho}$	$b_{1E\rho}$
Значение	13,669	0,1818	0,0108	0,7737	0,8401	0,1168

Ранее были исследованы физико-механические свойства дернового покрова заболоченной поверхности, установлено, что значения C [МПа], φ [°], ρ [г/см³] безотносительно

качественной характеристики дернового покрова с высокой точностью можно выразить через E :

$$C = a_{2EC} E^{b_{2EC}}, \quad (17)$$

$$\varphi = a_{2E\varphi} E^{b_{2E\varphi}}, \quad (18)$$

$$\rho = a_{2E\rho} E^{b_{2E\rho}}. \quad (19)$$

Значения коэффициентов в уравнениях (17)—(19) представлены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты для расчёта плотности, удельного сцепления и угла внутреннего трения дернового покрова заболоченного грунта по модулю деформации

Table 6. Coefficients for calculating the density, specific adhesion, and internal friction angle of the wetland turf cover modulus of deformation

Коэффициент	$a_{2E\varphi}$	$b_{2E\varphi}$	a_{2EC}	b_{2EC}	$a_{2E\rho}$	$b_{2E\rho}$
Значение	19,603	0,5461	0,0308	0,8753	0,8401	0,1168

Реологические свойства лесных и заболоченных грунтов исследованы слабо. В работе [11] показано, что в ряде случаев реология лесного почвогрунта при проведении практических расчётов глубины образующейся колеи корректно описывается моделью Максвелла — Томпсона. Результаты экспериментов по изучению связи вязкости лесного почвогрунта η и модуля его деформации E представлены на рисунке 1.

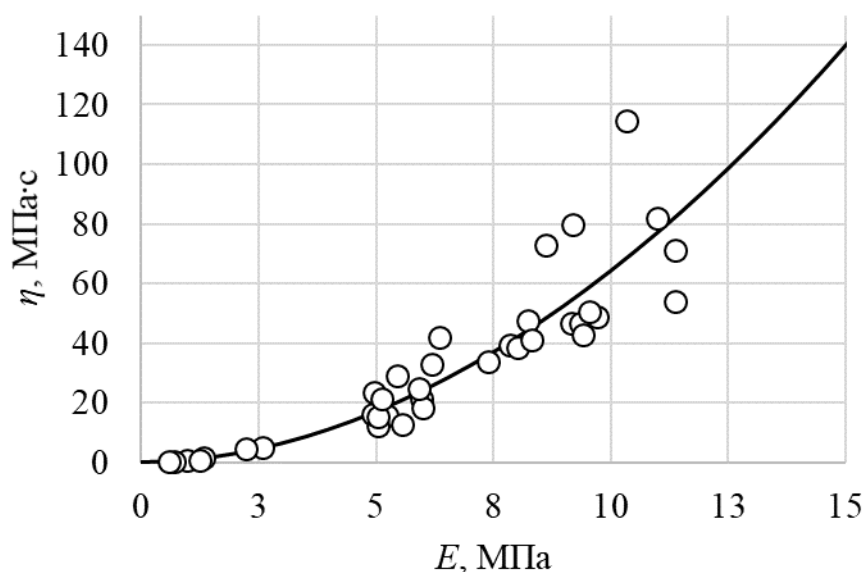


Рисунок 1. Вязкость образцов почвогрунта со связной основой в зависимости от модуля деформации

Figure 1. Viscosity of soil samples with a connected base depending on the modulus of deformation

По графику видим, что присутствуют ярко выраженная степенная зависимость вязкости и модуля деформации. Уравнение связи вязкости и модуля деформации в логарифмическом масштабе следующее:

$$\ln \eta = -0,258 \pm 0,078 + (1,92 \pm 0,024) \ln E. \quad (20)$$

В натуральном масштабе уравнение (20) имеет вид:

$$\eta = (0,78 \pm 0,06) E^{1,92 \pm 0,024}. \quad (21)$$

Коэффициент детерминации уравнения (21) $R^2 = 0,8439$.

Проводились исследования в области реологии почв [12—15]. Установлено, что выбор корректной реологической модели почвы зависит от необходимости учёта параметров процесса взаимодействия почвы с движителем (нагрузка, время воздействия) и физического состояния почвы (плотность, влажность, температура). Вопросы выбора и обоснования реологической модели опорной поверхности требуют дальнейшей проработки.

Конусный индекс представляет собой частное усилие, необходимое для вдавливания конического зонда с длиной конической части L , диаметром основания d , углом заточки α в грунт на глубину Z и площади основания наконечника зонда.

Точное аналитическое выражение для конусного индекса имеет вид:

$$CI = -C \operatorname{ctg} \varphi + \Theta \cdot \frac{24G^m (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi)(1 + \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha}{d^2 \gamma^2 (m-2)(m-3)(3 - \sin \varphi) \operatorname{tg}^3 \varphi}, \quad (22)$$

$$\Theta = \{C + (Z + L) \cdot \gamma \operatorname{tg} \varphi\}^{3-m} - \{C + Z \cdot \gamma \operatorname{tg} \varphi\}^{2-m} \cdot \{C + (Z + 3L - Lm) \cdot \gamma \operatorname{tg} \varphi\},$$

$$m = \frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}.$$

Удельное сцепление неорганического грунта найдём по уравнениям (3), (4), снега — (12), лесного почвогрунта — (14), дернового покрова заболоченного грунта — (17).

Угол внутреннего трения неорганического грунта определим по формулам (5), (6), снега — (13), лесного почвогрунта — (15), дернового покрова заболоченного грунта — (18).

Объёмный вес для всех опорных поверхностей найдем по формуле

$$\gamma = g\rho, \quad (23)$$

где g — ускорение свободного падения.

Для неорганических грунтов ρ определяется в зависимости от I_L , I_W , e , γ_c по уравнению (10) с учётом (7)—(9), для лесного почвогрунта и дернового покрова заболоченного грунта — по уравнениям (16), (19) в зависимости от E , для снега ρ является входной характеристикой.

Для модуля сдвига G известно несколько зависимостей, наиболее распространены три следующие [16], [17]:

$$G = \frac{5E}{2(1 + \mu)}, \quad (24)$$

$$G = 10V_s^2 \rho \approx 2900\rho, \quad (25)$$

$$G = 0,0225C + 0,25, \quad (26)$$

где V_S — скорость распространения сдвиговой волны в грунте ($V_S \approx 53,34$ м/с), μ — коэффициент Пуассона, множитель «5» при E показывает соотношение модуля упругости E_0 и модуля общей деформации E грунта.

Значения физико-механических свойств, характерных для определённых категорий лесного почвогрунта, представлены в таблице 7.

Таблица 7. Физико-механические свойства лесного почвогрунта в зависимости от категории

Table 7. Physical and mechanical properties of forest soil depending on the category

Параметр	Обозначение	Разм.	III (слабонесущий)	II (средней прочности)	I (прочный)
Модуль общей деформации	E	МПа	0,4	1	3
Модуль длительной деформации	E_0	МПа	0,4	1	3
Модуль упругости	E_0	МПа	2,0	5,0	15,0
Модуль сдвига	G	МПа	2,192	2,44	2,77
Коэффициент Пуассона	ν	б/р	0,35	0,25	0,15
Вязкость	η	МПа·с	1,343	7,8	64,29
Удельное сцепление	C	МПа	0,005	0,012	0,024
Угол внутреннего трения	φ	°	11	15	16
Удельный вес	γ	МН/м ³	0,0075	0,0085	0,0095
Конусный индекс	CI	МПа	0,243	0,464	1,003
Несущая способность	p_s	МПа	0,0504	0,117	0,287
Толщина деформируемого слоя	H	м	0,8	0,4	0,3

Расчёт модуля деформации E , удельного сцепления C , угла внутреннего трения φ неорганических грунтов проводится по формулам (1)—(6), модуль сдвига G связных грунтов определяем по уравнениям (23), (25), несвязных — по формуле (24). Физические свойства неорганических грунтов рассчитываются по формулам (7)—(10).

Для снега C , φ , E рассчитываются по формулам (11)—(13) в зависимости от плотности ρ ; свойства лесного почвогрунта определяются функциями (14)—(16), заболоченного грунта — (17)—(19) в зависимости от E .

Конусный индекс опорной поверхности CI находится по формуле (22) в зависимости от её свойств. Расчёты выполнены при изменении плотности грунтов от рыхлых до плотных

(коэффициент пористости $e = 0,4—1$), консистенция — от текучей до твёрдой для неорганических связных грунтов (индекс консистенции I_L от -1 до 1), от влагонасыщенной до сухой для песков (индекс водонасыщения I_w в пределах от -1 до 1). Изменение модуля общей деформации лесных почвогрунтов составляло от $0,4$ до 3 МПа (от слабонесущего до прочного лесного почвогрунта), заболоченных грунтов — от $0,2$ до $1,2$ МПа. Плотность снега ρ изменялась от $0,1$ г/см³ (очень рыхлый снег) до $0,5$ г/см³ (очень плотный снег).

Сопоставление исходных и расчётных данных показало, что для большинства рассмотренных опорных поверхностей с высокой точностью выполняются соотношения:

$$y_{mech} = \psi_0 X_{mech}^{y_{mech}}, \quad (27)$$

$$y_{mech} = \vartheta_0 X_d^{\vartheta_d} X_m^{\vartheta_m}, \quad (28)$$

где y_{mech} , X_{mech} — одна из механических характеристик опорной поверхности (E , CI , $p_{s0,ref}$, $p_{s,ref}$), X_d — параметр, характеризующий плотность; X_m — параметр, характеризующий влажность или консистенцию; ψ_0 , ϑ_0 — числовые коэффициенты; для связных грунтов X_d и X_m являются e и I_L либо ρ и W , для песков — e и I_w либо ρ и W . Значения коэффициентов представлены в таблицах 7—11.

3. Результаты

Как было отмечено, сходимость расчётных данных, для оценки которой использован коэффициент детерминации, высокая ($R^2 > 0,9$). Несколько менее сходятся с исходными расчётными данными оценки, получаемые по:

- зависимостям для определения CI , $p_{s0,ref}$, $p_{s,ref}$ по I_L , e и E по W , ρ для глины ($0,85 < R^2 < 0,89$);
- зависимостям для определения $p_{s,ref}$ по I_w , e и по W , ρ для песков, кроме крупнозернистого ($0,85 < R^2 < 0,90$);
- зависимости для определения E по CI для глины ($R^2 = 0,865$);
- зависимостям для определения $p_{s,ref}$ по CI либо E для песков, кроме крупнозернистого ($0,85 < R^2 < 0,90$).

Исключение составляют:

- зависимости для определения CI , $p_{s0,ref}$, $p_{s,ref}$ по I_L , e для супеси ($0,75 < R^2 < 0,8$);
- зависимости для определения E , CI , $p_{s0,ref}$, $p_{s,ref}$ по W , ρ для супеси ($0,65 < R^2 < 0,7$);
- зависимости для определения CI , $p_{s0,ref}$, $p_{s,ref}$ по W , ρ для суглинка ($0,72 < R^2 < 0,77$);
- зависимости для определения $p_{s,ref}$ по I_w , e и по W , ρ для крупнозернистого песка ($0,78 < R^2 < 0,80$);
- зависимости для определения $p_{s,ref}$ по CI либо E для крупнозернистого песка ($R^2 = 0,78$), в связи с чем при оперативном контроле состояния опорной поверхности рекомендуется определять механические свойства супесей и суглинков по результатам зондирования. Механические свойства крупнозернистого песка рекомендуется определять на основе результатов непосредственных замеров.

Таблица 9. Коэффициенты взаимосвязей модуля деформации, конусного индекса и несущей способности (несвязные грунты)

Table 9. Coefficients of relationships between the strain modulus, cone index and load-bearing capacity (non-cohesive soils)

Функция	Крупнозернистый песок		Среднезернистый песок		Мелкозернистый песок		Пылеватый песок	
	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1
	$E(CI)$	12,4	0,620	18,5	0,331	14,1	0,538	7,26
$p_{s0,ref}(CI)$	0,0512	0,902	0,0422	1,16	0,0576	0,845	0,0738	0,879
$p_{s,ref}(CI)$	0,0649	1,000	0,0580	1,15	0,0666	0,976	0,0882	1,03
$p_{s0,ref}(E)$	0,00134	1,45	0,00125	1,32	0,00103	1,53	0,00499	1,36
$p_{s,ref}(E)$	0,00113	1,61	0,000960	1,52	0,000631	1,77	0,00380	1,59

Таблица 10. Коэффициенты взаимосвязей модуля деформации, конусного индекса и несущей способности и физических свойств (связные неорганические грунты)

Table 10. The coefficients of the relationships between modulus of deformation, cone index and load-carrying ability and physical properties (inorganic cohesive soils)

Функция	Супесь			Суглинок			Глина		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
$CI(I_L, e)$	0,221	-2,85	-0,592	0,585	-2,58	-0,404	0,696	-2,06	-0,775
$p_{s0,ref}(I_L, e)$	0,0269	-2,10	-0,442	0,0683	-1,97	-0,328	0,153	-2,24	-1,02
$p_{s,ref}(I_L, e)$	0,0289	-2,20	-0,466	0,0719	-2,04	-0,338	0,157	-2,39	-1,07
$CI(W, \rho)$	81,5	-2,90	6,34	124,5	-2,44	5,95	177,7	-2,14	4,35
$E(W, \rho)$	117,6	-1,84	4,88	85,2	-1,47	4,54	47873	-3,33	5,73
$p_{s0,ref}(W, \rho)$	2,08	-2,13	4,65	4,68	-1,90	4,53	160,1	-2,57	4,76
$p_{s,ref}(W, \rho)$	2,78	-2,23	4,87	5,44	-1,95	4,69	241,2	-2,72	5,07

Таблица 11. Коэффициенты взаимосвязей модуля деформации, конусного индекса и несущей способности и физических свойств (несвязные грунты)

Table 11. The coefficients of the relationships between modulus of deformation, cone index and load-carrying ability and physical properties (non-cohesive soils)

Функция	Песок крупнозернистый			Песок среднезернистый			Песок мелкозернистый			Песок пылеватый		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
$CI(I_{w,e})$	1,90	-2,08	-0,0518	0,920	-3,90	-0,0454	0,775	-2,96	-0,0294	0,748	-2,84	-0,386
$P_{s0,ref}(I_{w,e})$	0,095	-1,87	-0,116	0,0399	-4,52	-0,133	0,0492	-2,51	-0,0834	0,0587	-2,51	-0,279
$P_{s,ref}(I_{w,e})$	0,126	-2,07	-0,0859	0,0530	-4,48	-0,0593	0,0549	-2,90	-0,0735	0,0681	-2,94	-0,310
$CI(W,\rho)$	0,958	-0,641	5,33	0,309	-1,25	9,93	0,443	-0,981	7,30	1,76	-1,20	6,17
$E(W,\rho)$	13,4	-0,420	3,22	13,2	-0,425	3,25	14,4	-0,616	3,56	10,7	-0,780	3,97
$P_{s0,ref}(W,\rho)$	0,0393	-0,531	4,97	0,00878	-1,40	11,6	0,0202	-0,757	6,44	0,0986	-1,02	5,60
$P_{s,ref}(W,\rho)$	0,0541	-0,618	5,45	0,0141	-1,43	11,5	0,0216	-0,889	7,37	0,118	-1,18	6,58
	$R^2 < 0,7$			$0,7 \leq R^2 < 0,8$			$0,8 \leq R^2 < 0,9$			$R^2 \geq 0,9$		

Расчётные данные проиллюстрированы на рисунках 2—18.

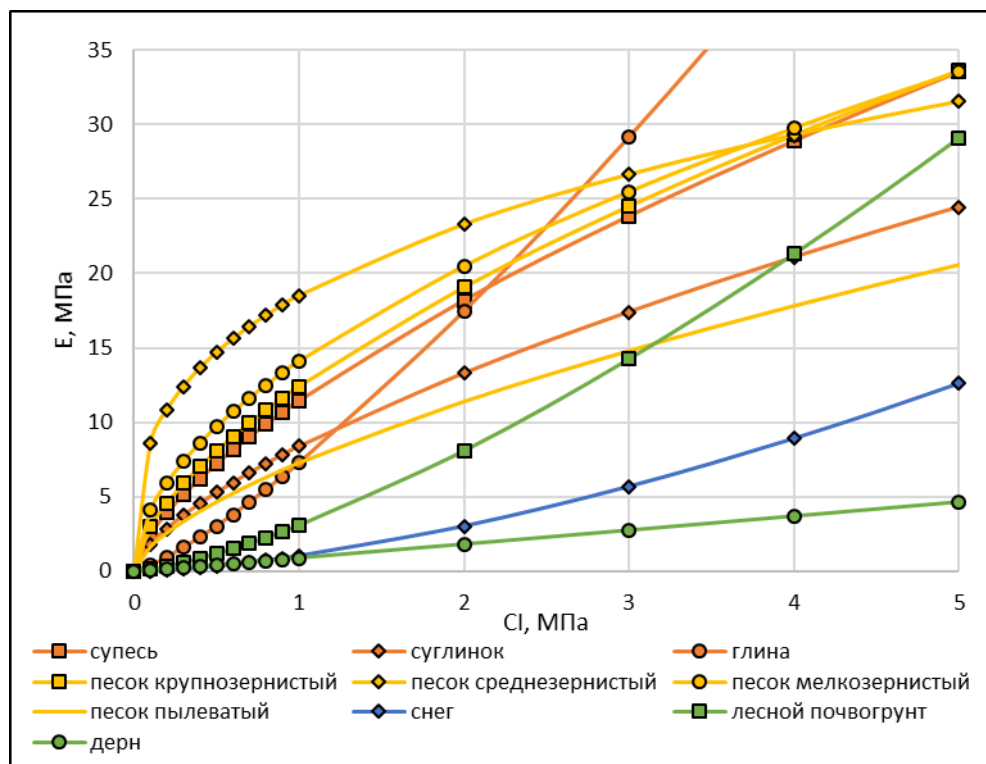


Рисунок 2. Зависимости модуля деформации от конусного индекса

Figure 2. Dependence of the strain modulus on the cone index

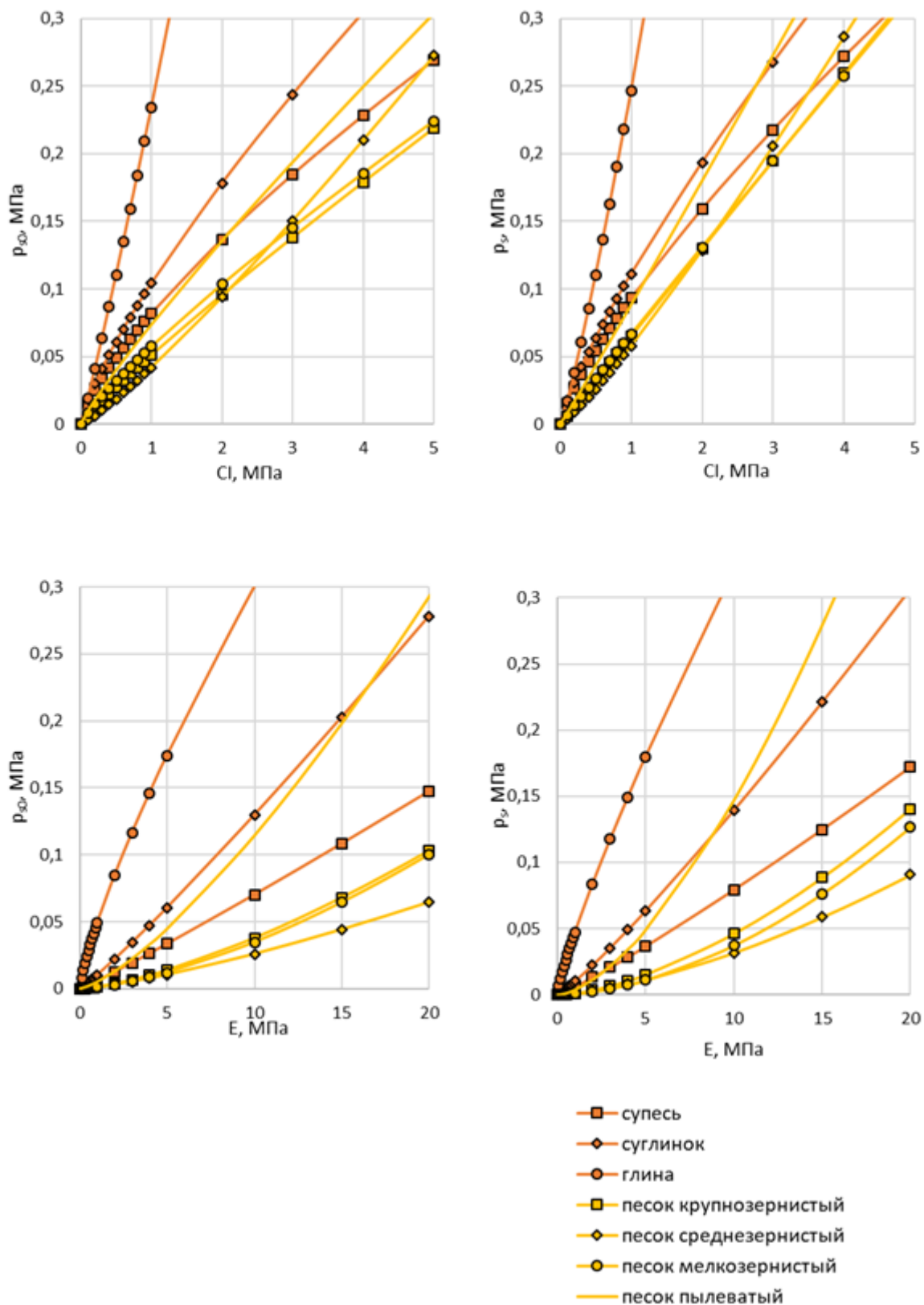


Рисунок 3. Взаимосвязи механических свойств (неорганические грунты)

Figure 3. Relationships of mechanical properties (inorganic soils)

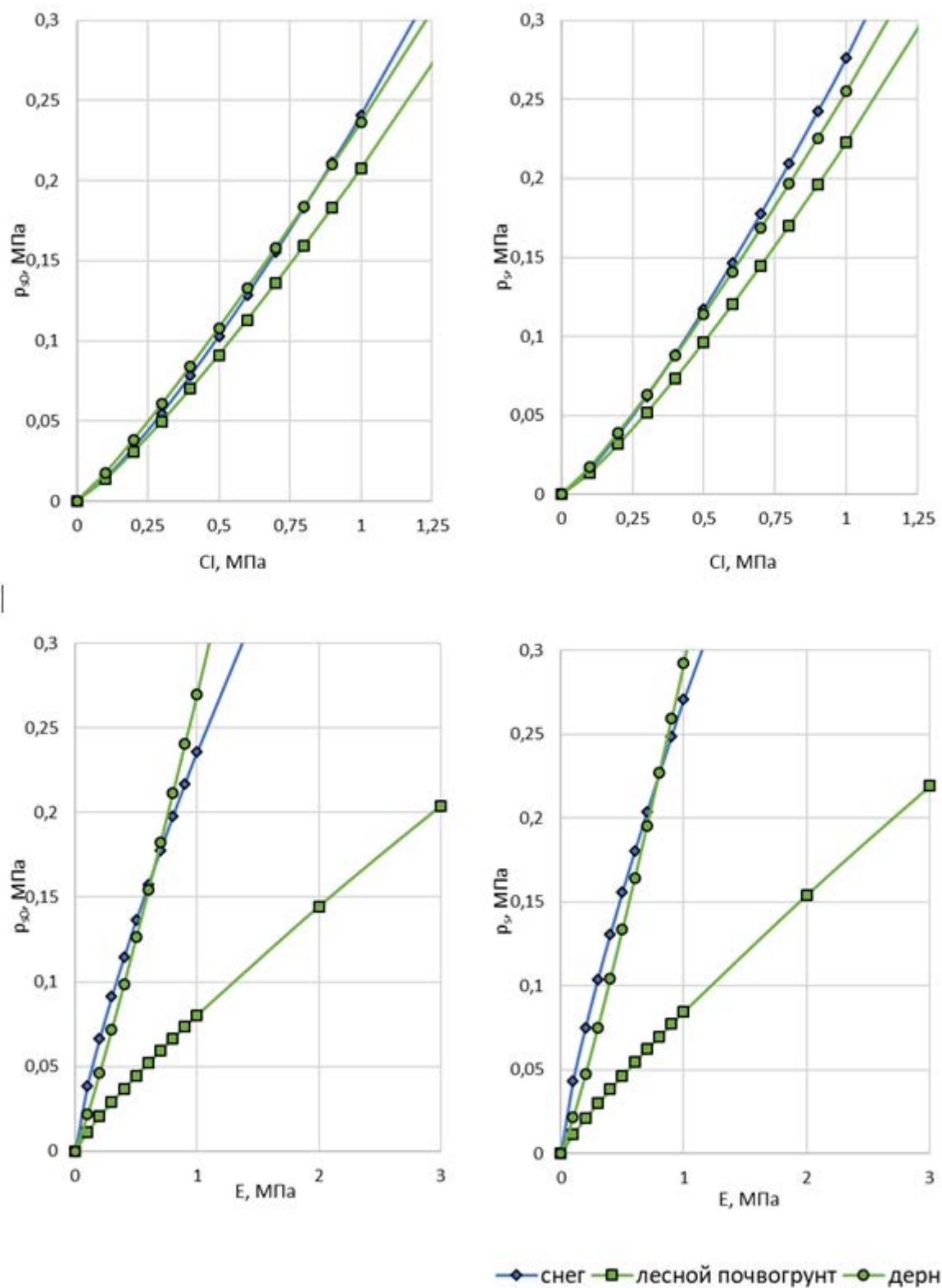


Рисунок 4. Взаимосвязи механических свойств (снег и лесные грунты)

Figure 4. Relationships of mechanical properties (snow and forest soils)

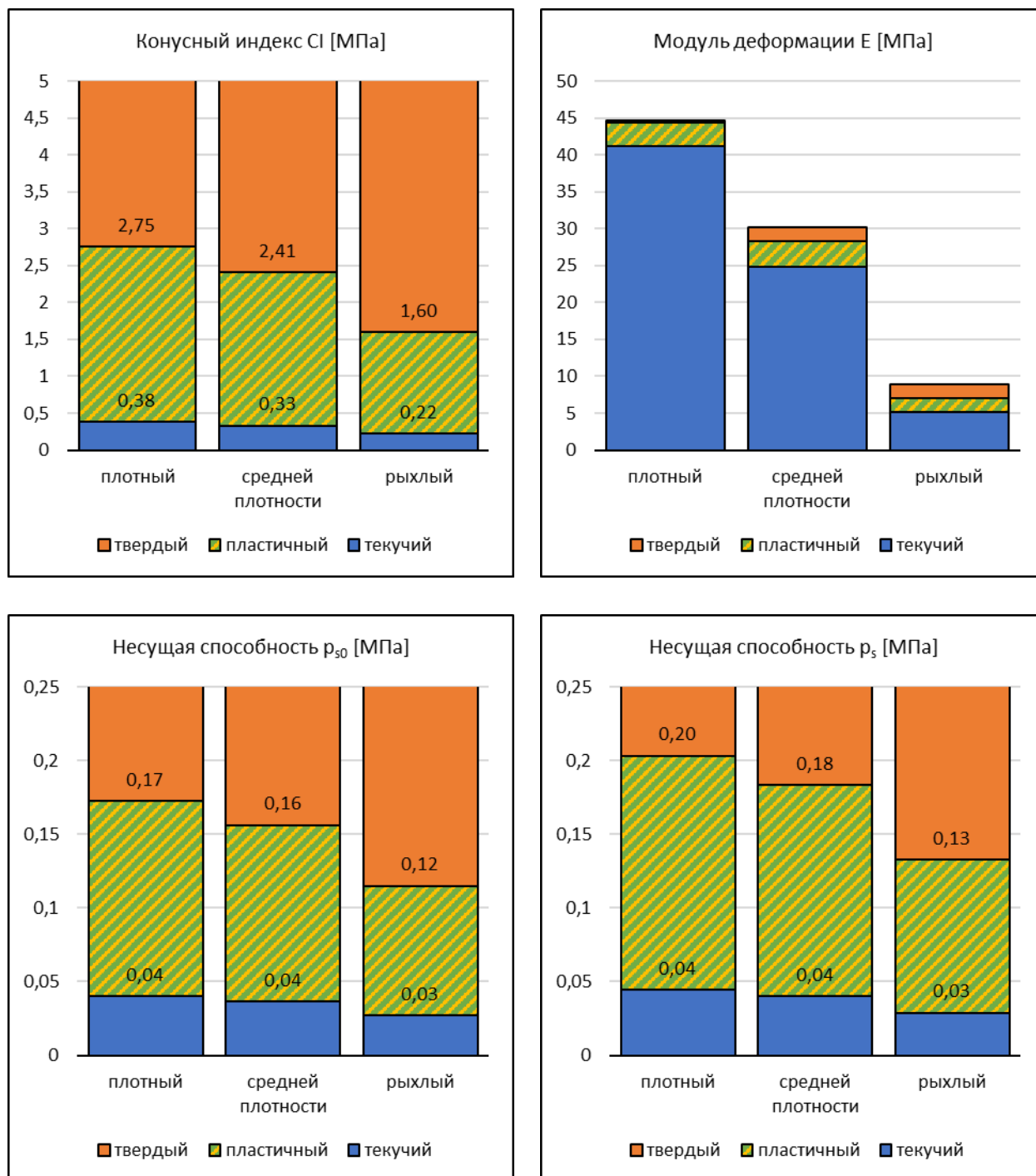


Рисунок 5. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность супесчаного грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 5. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of sandy loam soil depending on the aggregate state and density

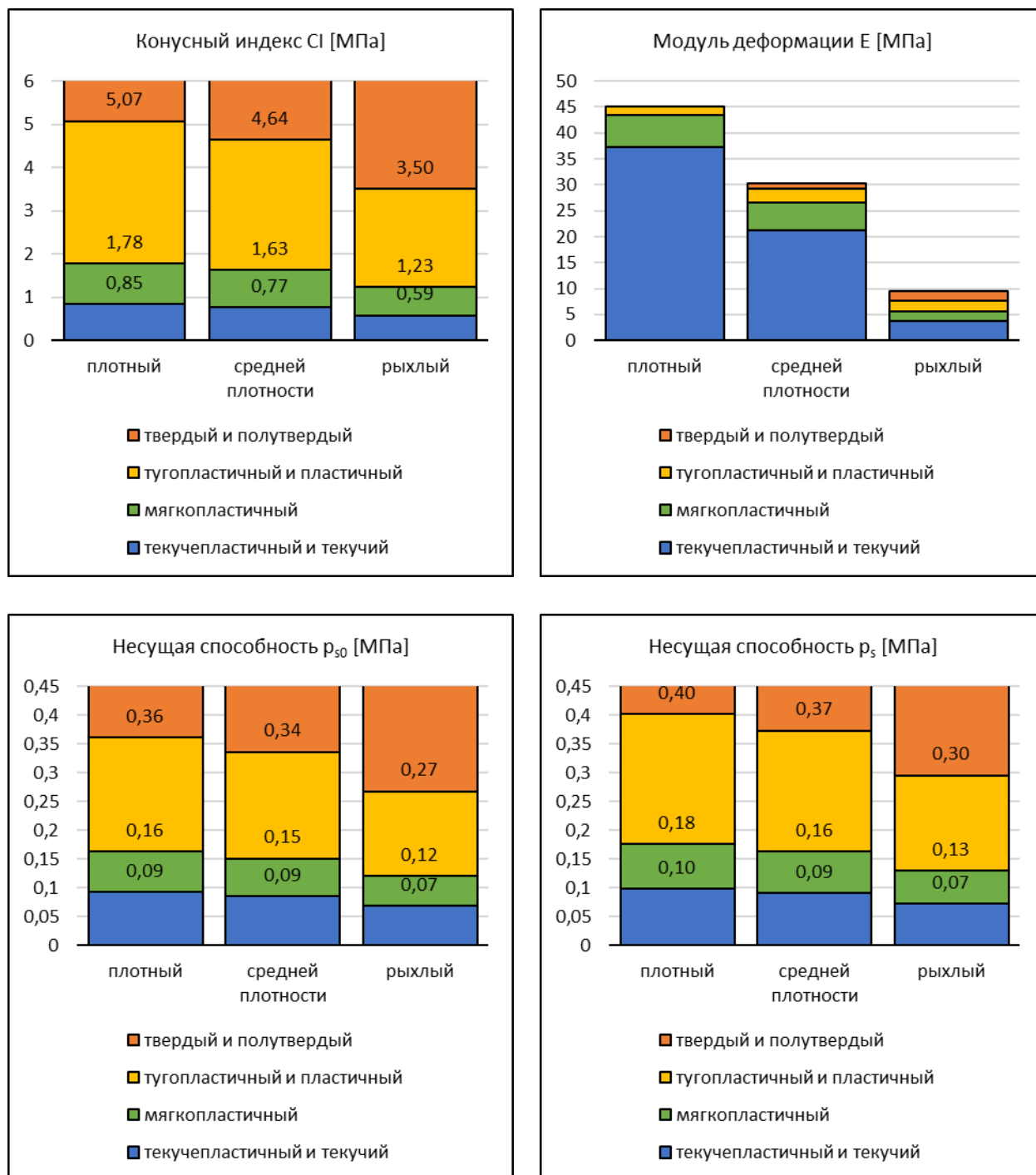


Рисунок 6. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность суглинистого грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 6. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of loamy soil depending on the aggregate state and density

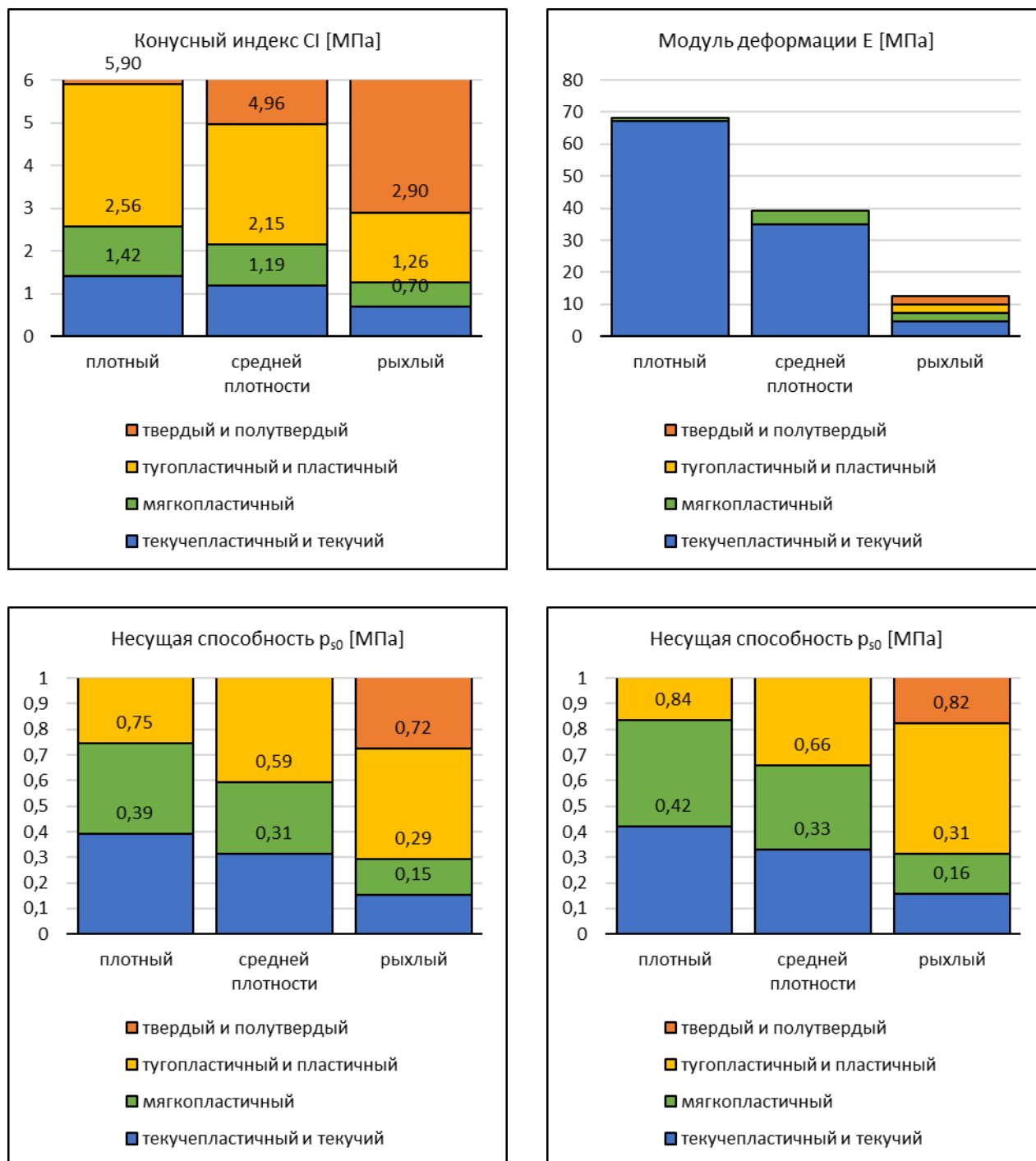


Рисунок 7. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность глинистого грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 7. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of clay soil depending on the aggregate state and density

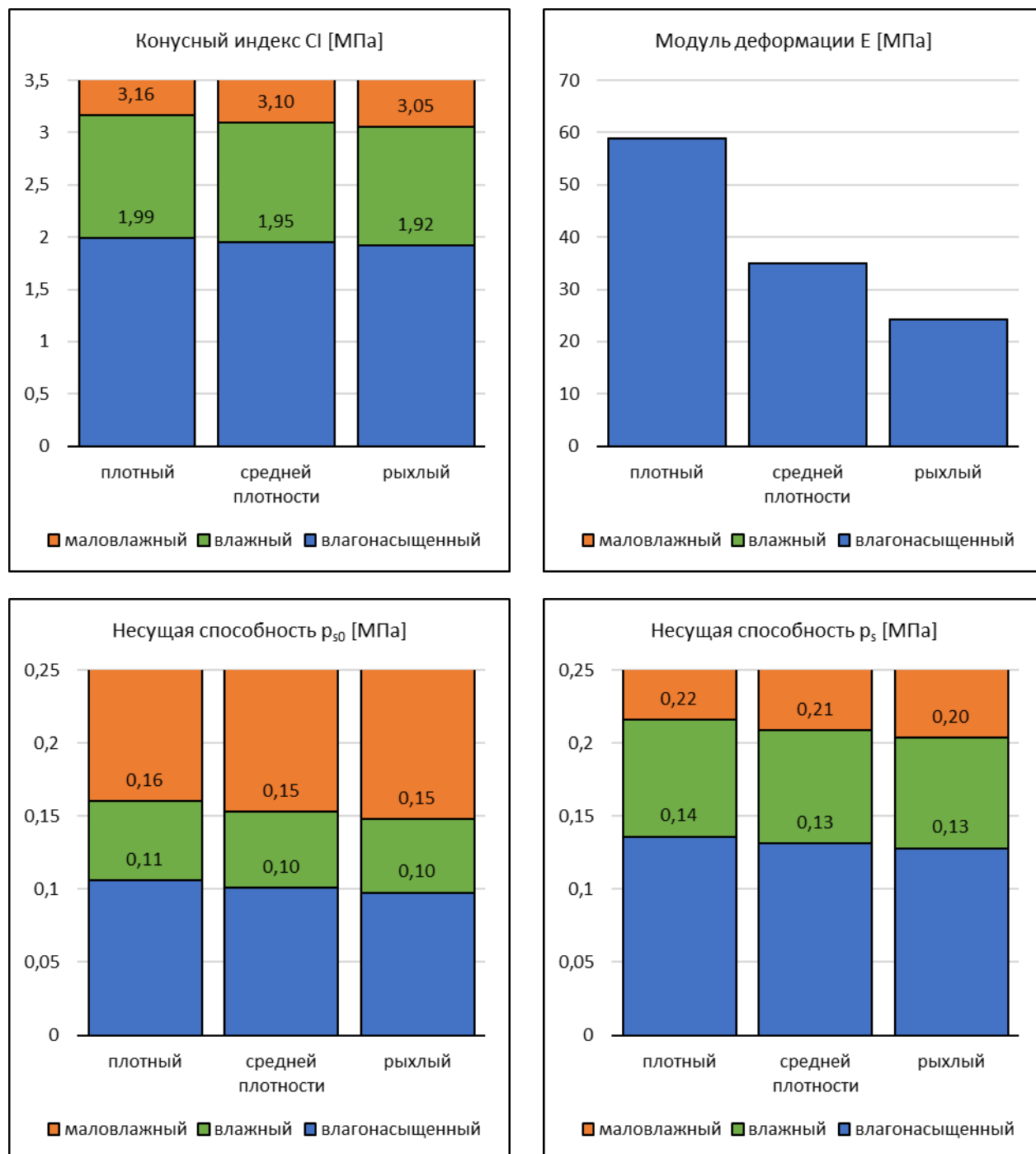


Рисунок 8. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность крупнозернистого песчаного грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 8. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of coarse-grained sandy soil depending on the aggregate state and density

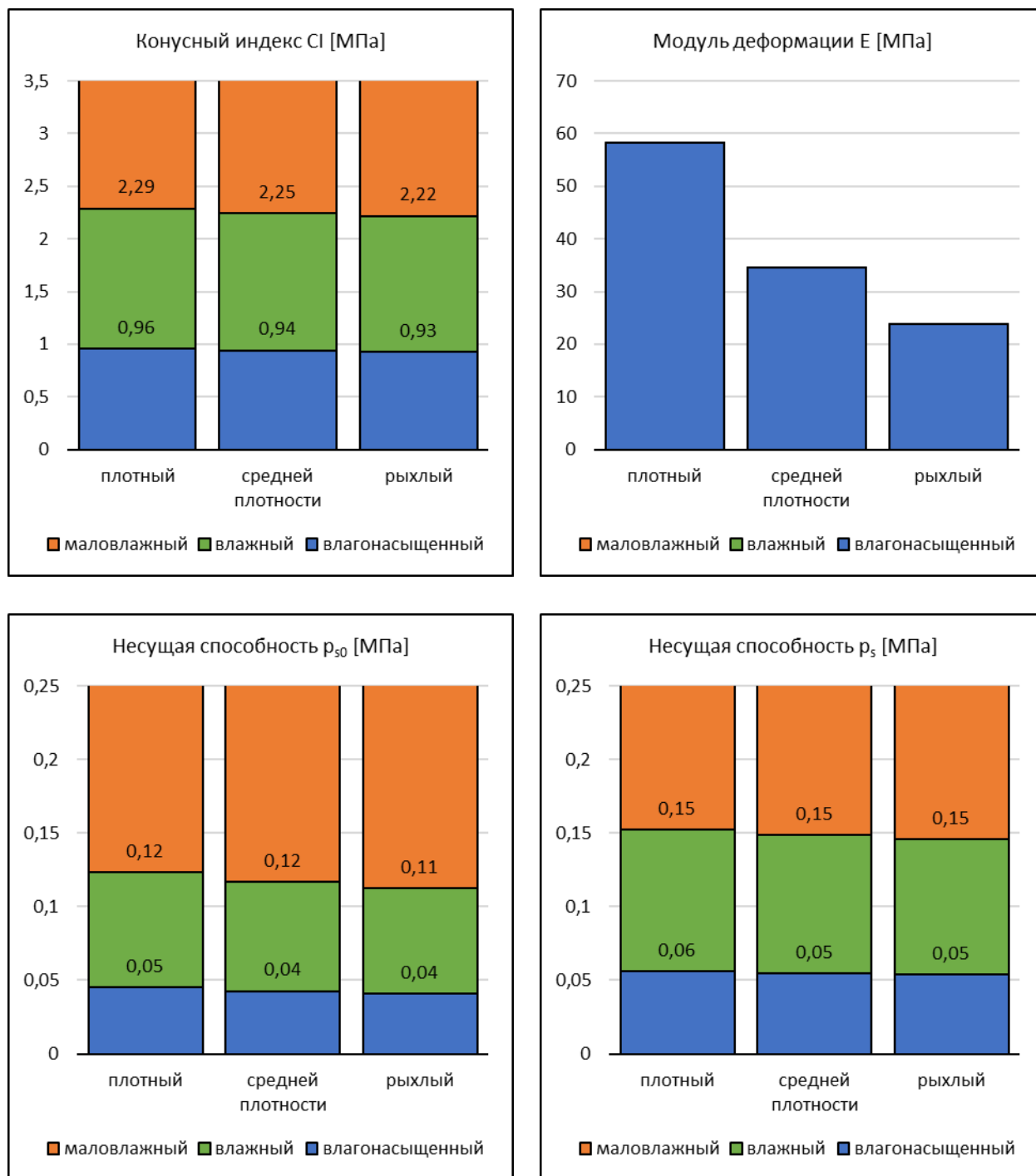


Рисунок 9. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность среднезернистого песчаного грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 9. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of medium-grained sandy soil depending on the aggregate state and density

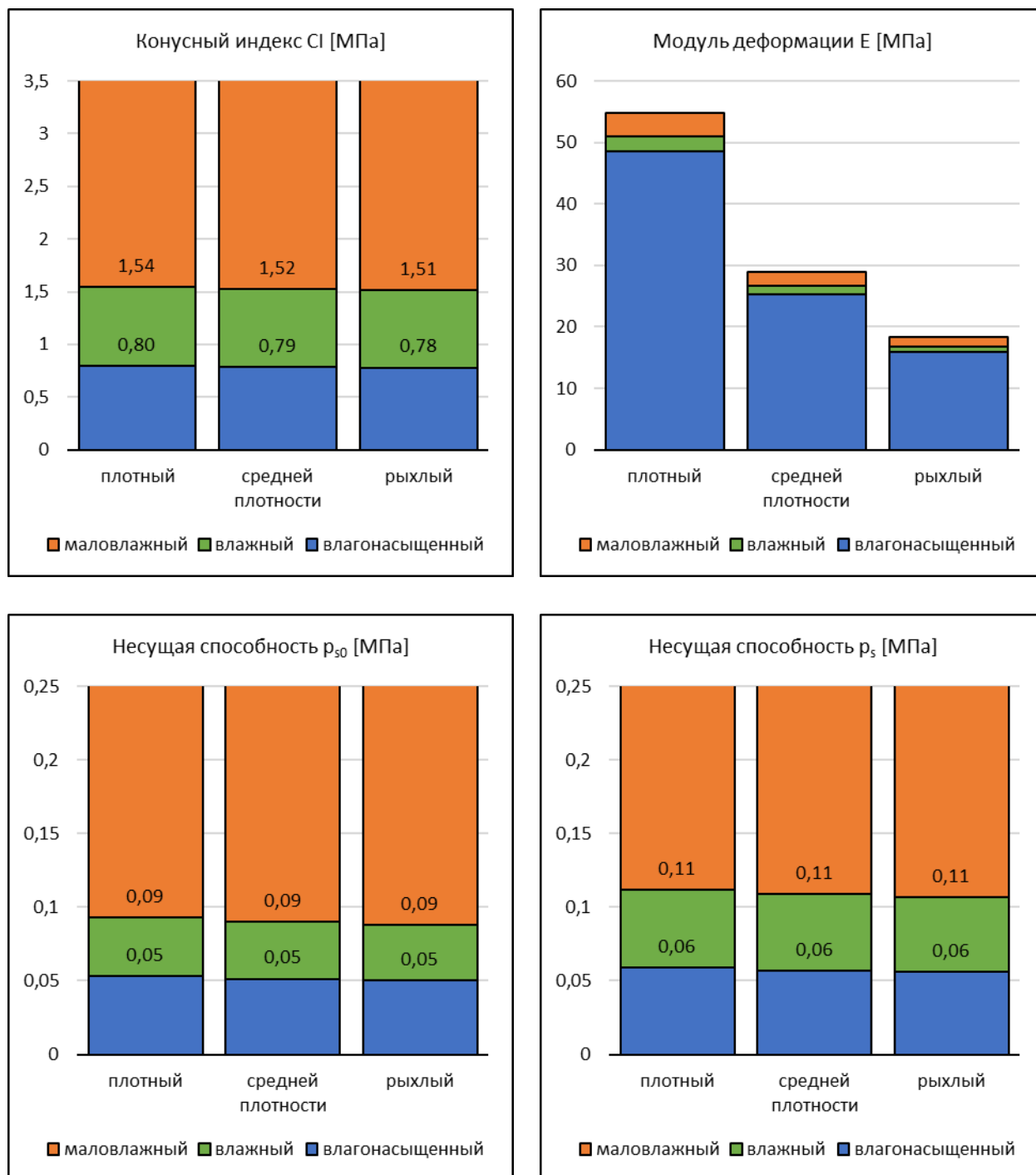


Рисунок 10. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность мелкозернистого песчаного грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 10. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of fine-grained sandy soil depending on the aggregate state and density

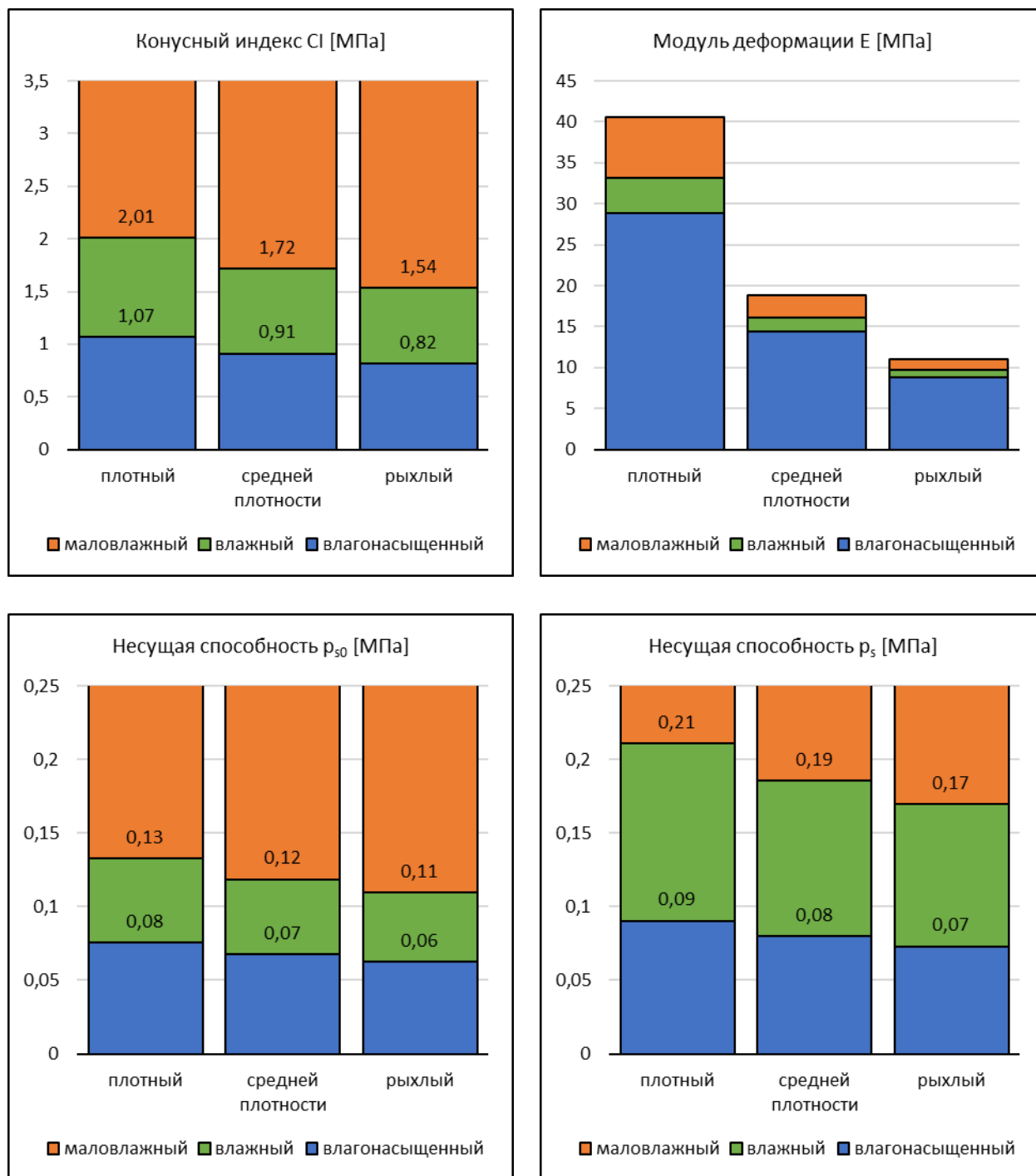


Рисунок 11. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность пылеватого песчаного грунта в зависимости от агрегатного состояния и плотности

Figure 11. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of dusty sandy soil depending on the aggregate state and density

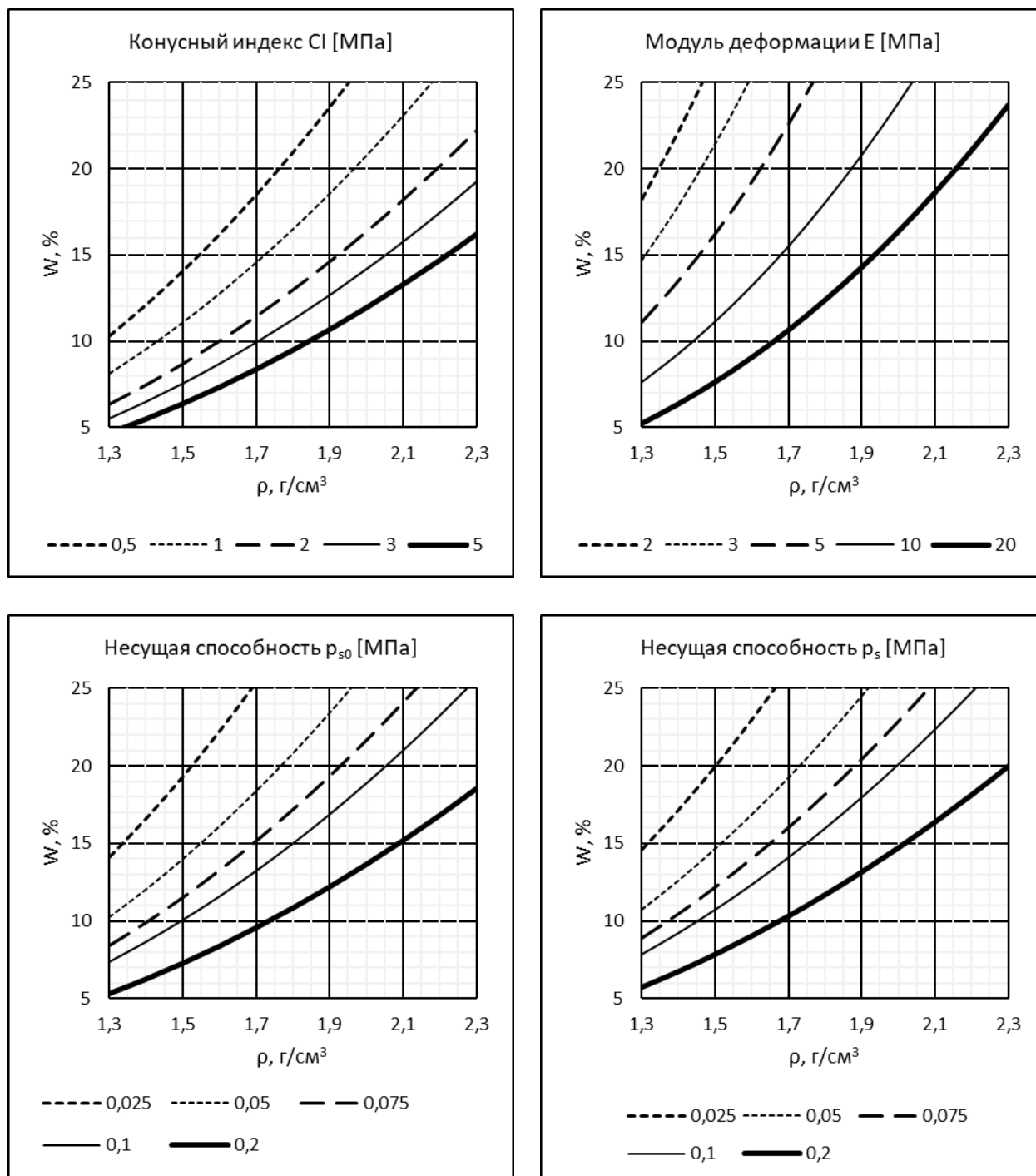


Рисунок 12. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность супесчаного грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 12. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of sandy loam soil depending on humidity and density

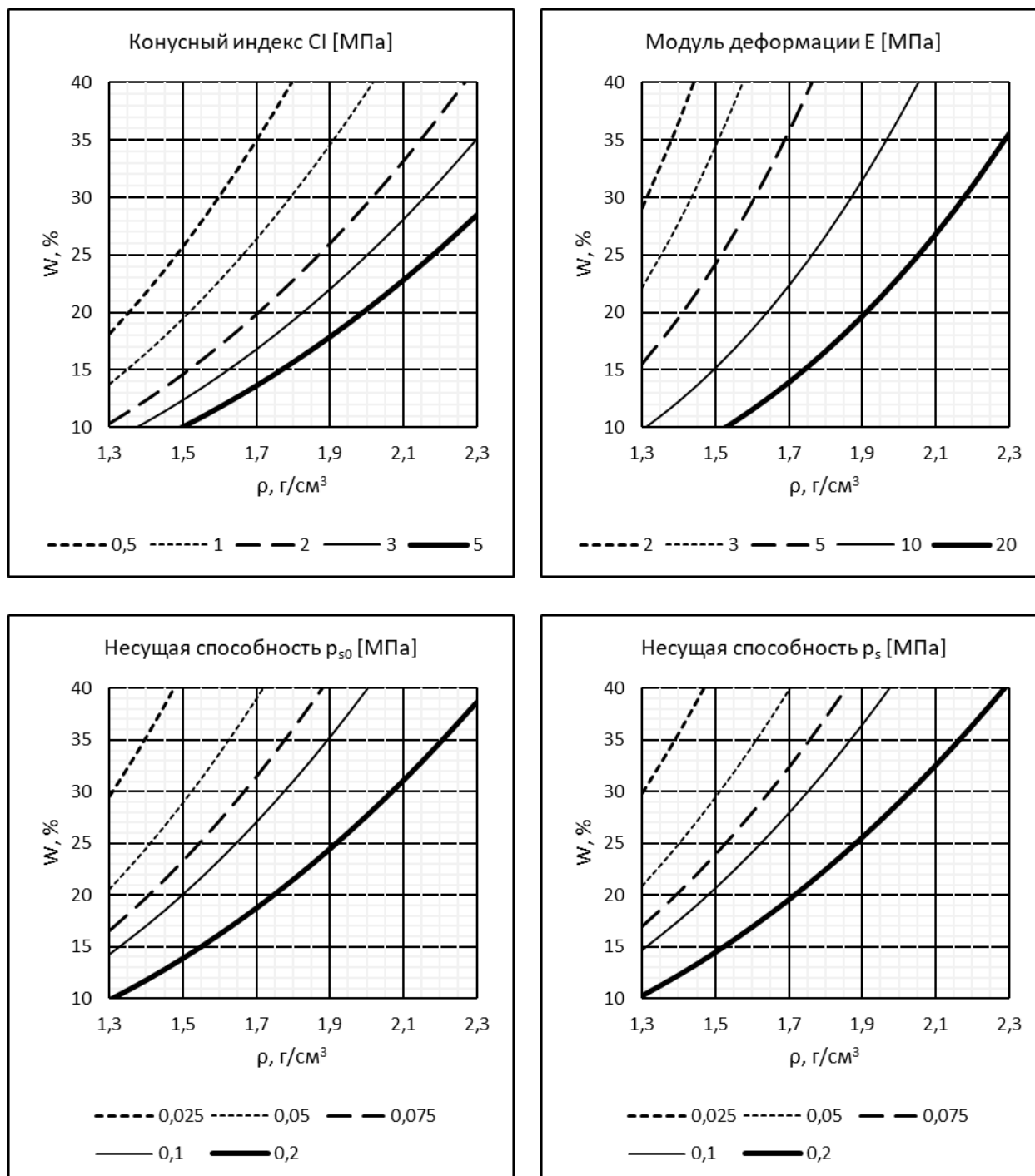


Рисунок 13. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность суглинистого грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 13. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of loamy soil depending on humidity and density

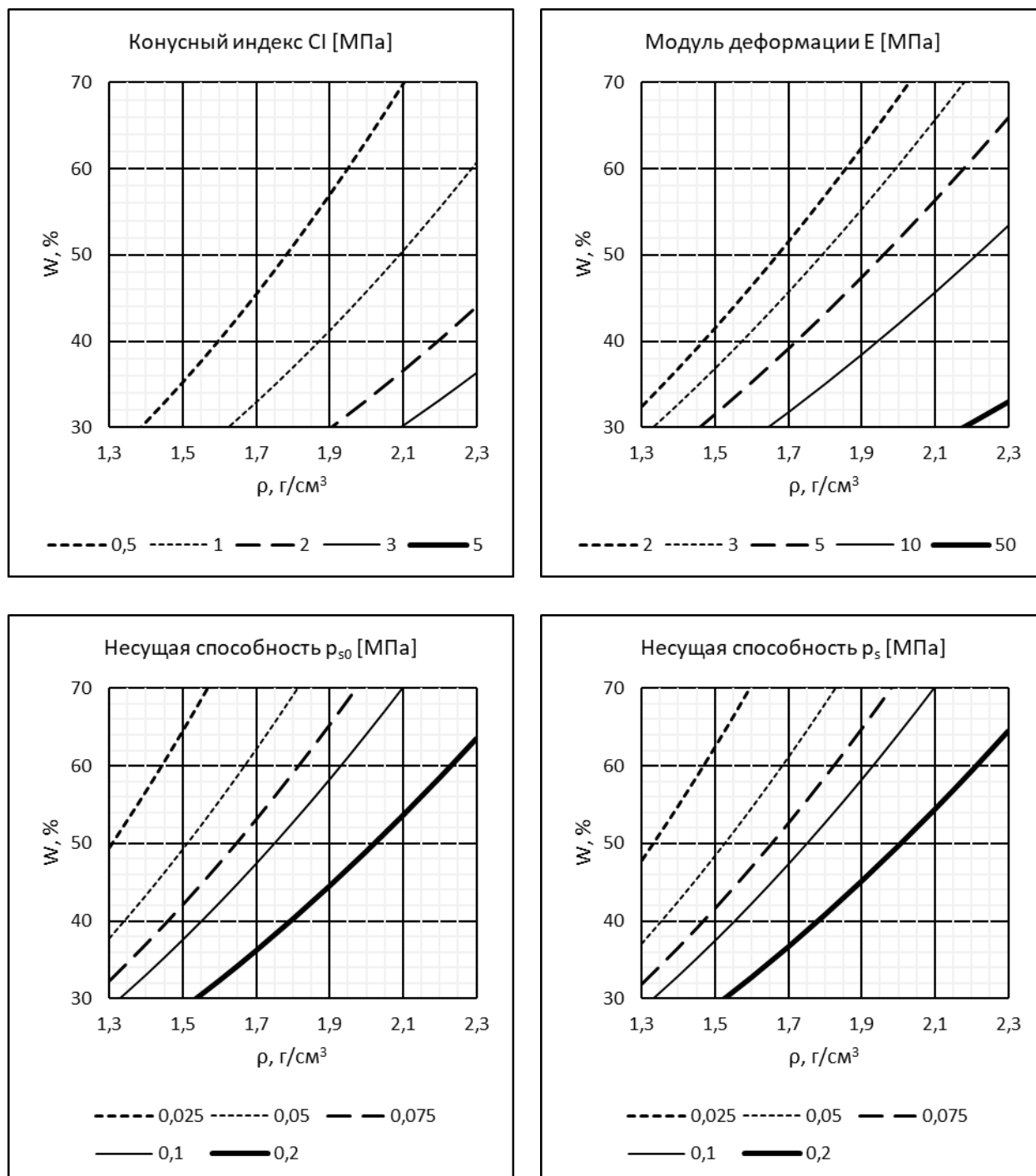


Рисунок 14. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность глинистого грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 14. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of clay soil depending on humidity and density

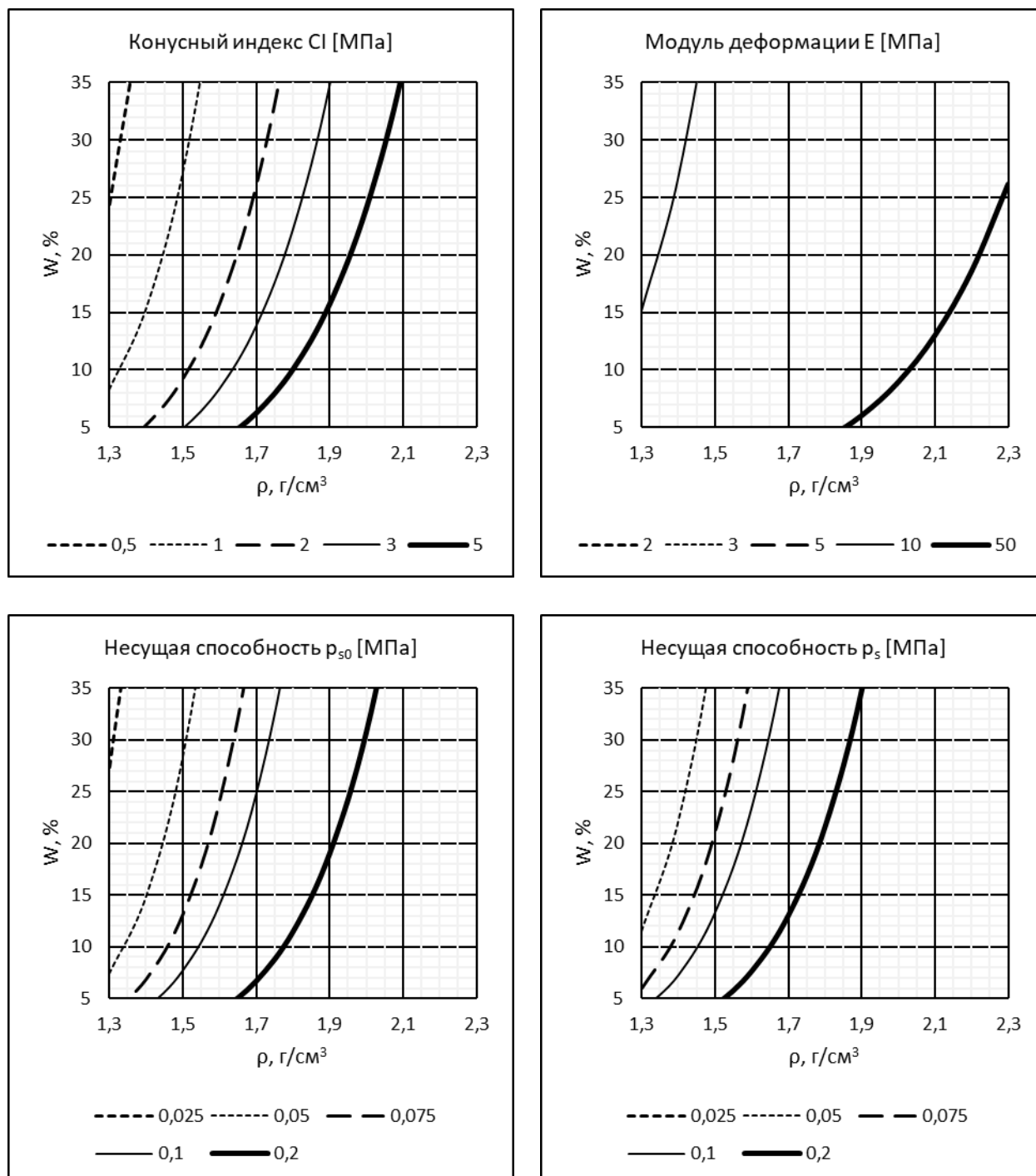


Рисунок 15. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность крупнозернистого песчаного грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 15. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of coarse-grained sandy soil depending on humidity and density

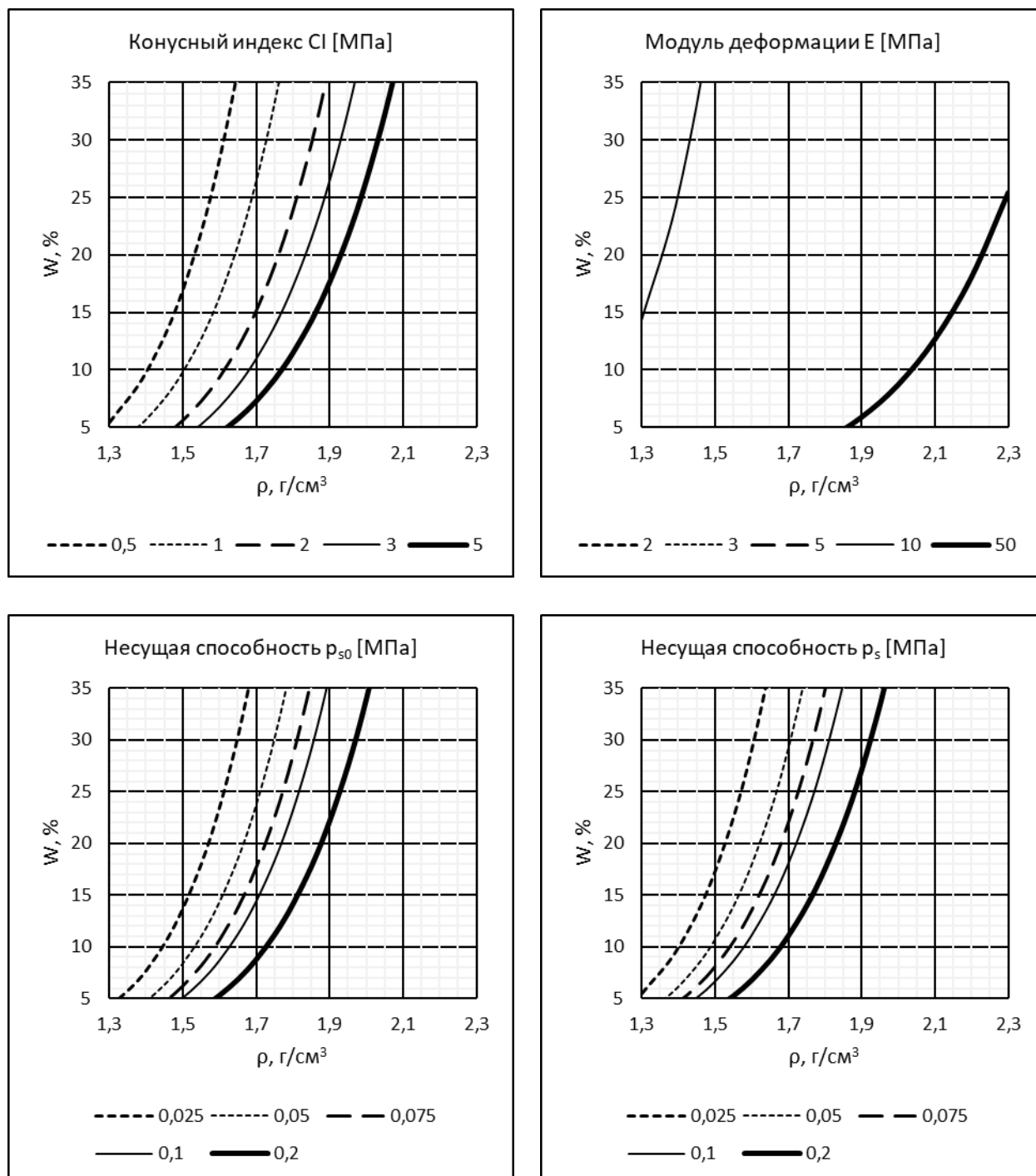


Рисунок 16. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность средnezернистого песчаного грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 16. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of medium-grained sandy soil depending on humidity and density

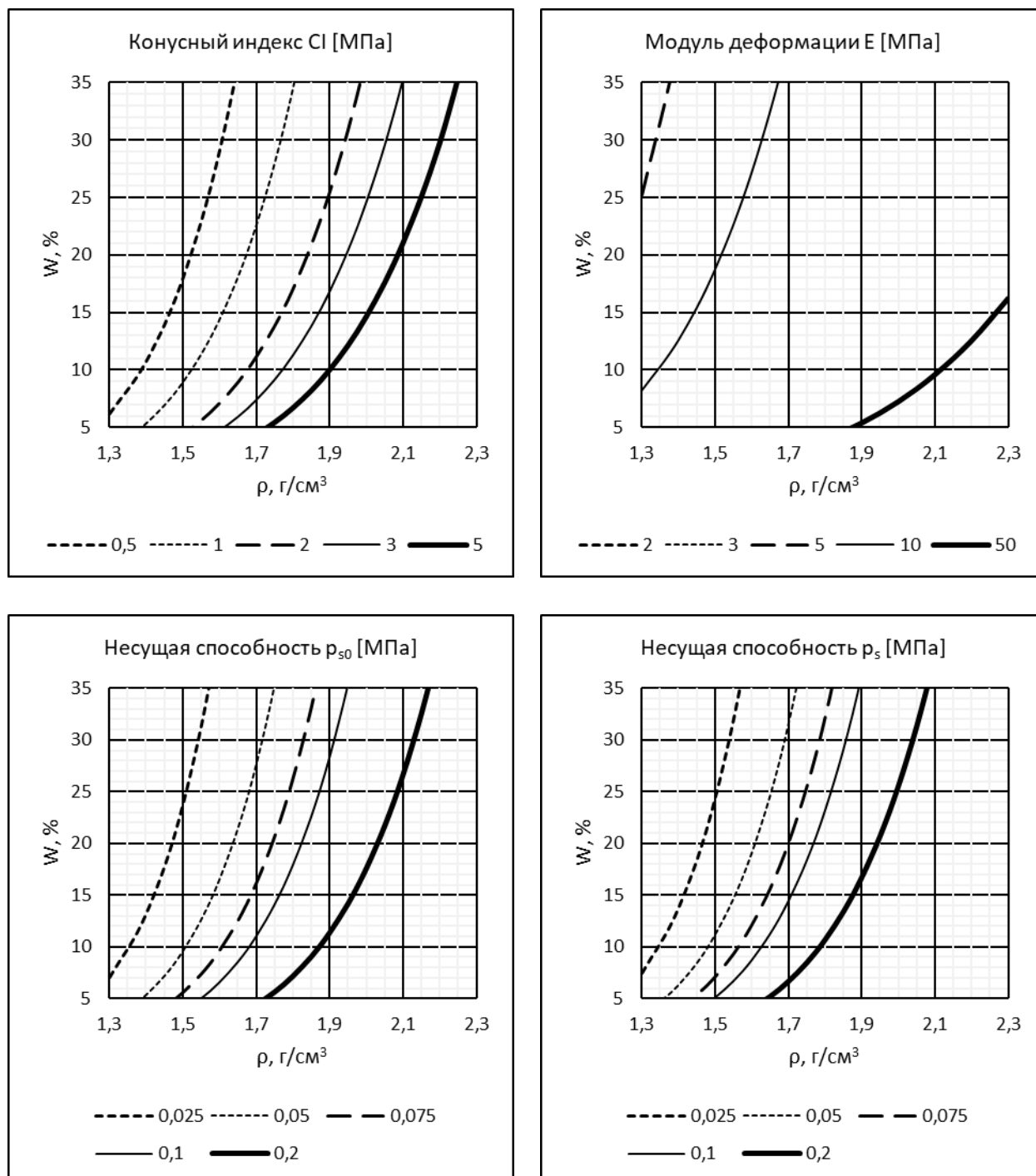


Рисунок 17. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность мелкозернистого песчаного грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 17. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of fine-grained sandy soil depending on humidity and density

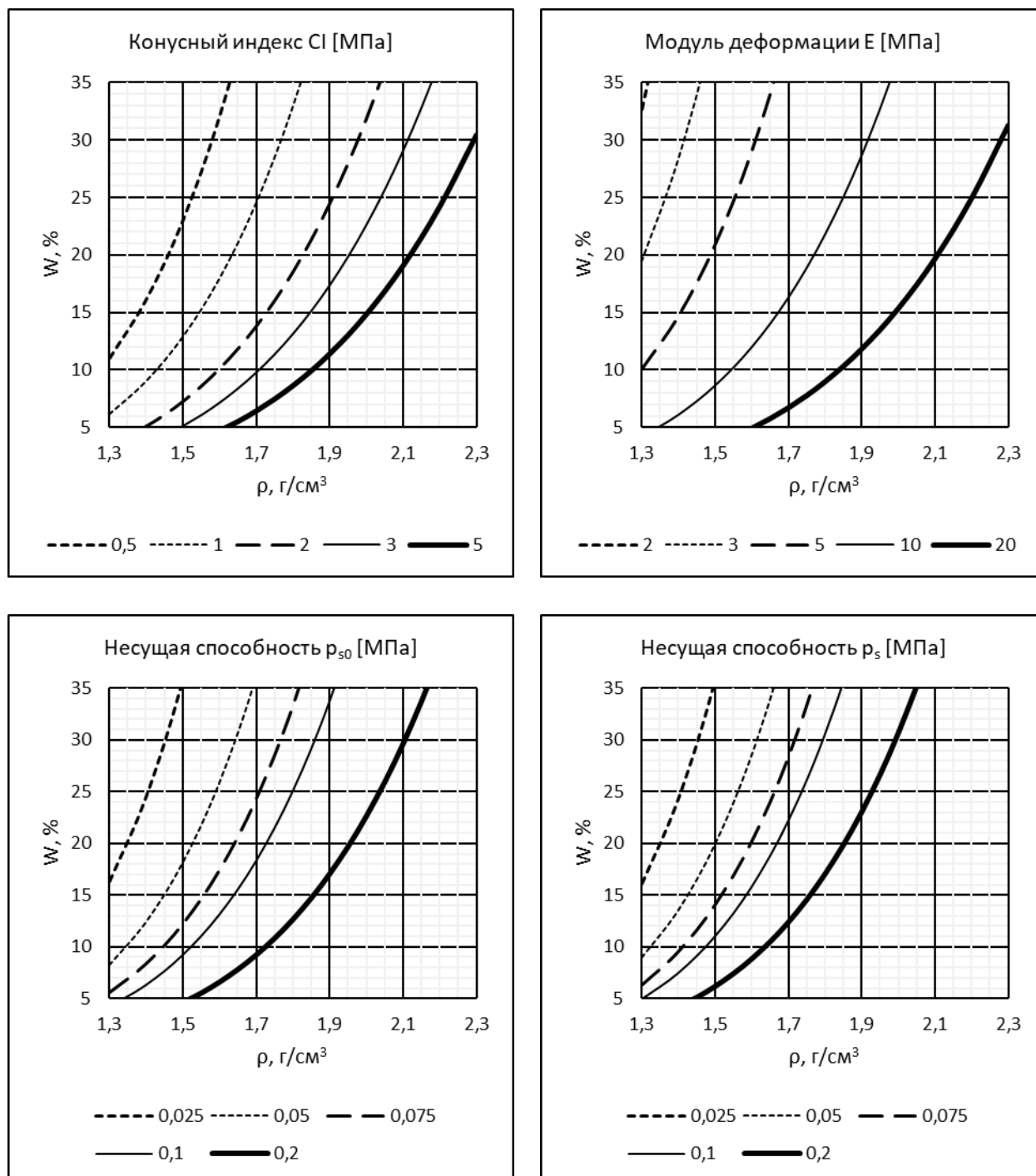


Рисунок 18. Модуль деформации, конусный индекс и несущая способность пылеватого песчаного грунта в зависимости от влажности и плотности

Figure 18. Modulus of deformation, cone index and bearing capacity of dusty sandy soil depending on humidity and density

4. Обсуждение и заключение

В результате вышеприведённого анализа установлено: сопоставление значений модуля деформации, несущей способности и сопротивления зондированию (конусного индекса) связных (глины, суглинки, супеси) и несвязных (пески) неорганических грунтов, заболоченного и лесного почвогрунта, снега показало, что между механическими свойствами опорных поверхностей присутствуют тесные взаимосвязи, описываемые степенными функциями (27). При оперативном контроле состояния опорной поверхности модуль деформации и несущую способность можно определить зондированием в полевых условиях. Исключение составляет крупнозернистый песок, модуль деформации и несущую способность которого можно определить только в результате лабораторных исследований.

Анализ расчётных данных по механическим свойствам опорных поверхностей показал, что сведения о модуле деформации и несущей способности глин и несвязных грунтов также могут быть получены по физическим свойствам, характеризующим плотность и консистенцию грунта с использованием степенных зависимостей вида (28). Оценки механических свойств супесей и суглинков по влажности и плотности менее надёжны, для таких опорных поверхностей рекомендуется оперативный контроль по результатам зондирования.

Список литературы

1. Бурмистрова О. Н., Чемшикова Ю. М., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Тамби А. А. Теоретическое обоснование параметров средоадаптивного движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 81—88. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-3-81-88.
2. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Тетеревлева Е. В., Чемшикова Ю. М. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10.
3. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Якутск, 2018. С. 67—71.
4. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
5. Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 s.
6. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Санкт-Петербургская лесотехническая академия, 2006. 235 с.
7. Бартенев И. М., Драналюк М. В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61—66.
8. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Экологическая оптимизация технологических машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Университет Йоэнсуу, 1998. 178 с.
9. Хахина А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 318 с.

10. *Ларин В. В.* Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 530 с.
11. *Песков В. Б.* Совершенствование моделей для оценки колееобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колёсных лесных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
12. *Золотаревская Д. И.* Закономерности динамического деформирования почв при циклических нагрузках // Почвоведение. 2005. № 5. С. 565—574.
13. *Золотаревская Д. И.* Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой почвы при динамических нагрузках // Почвоведение. 2010. № 3. С. 313—323.
14. *Золотаревская Д. И.* Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой супесчаной почвы при воздействии колёсного трактора // Почвоведение. 2013. № 7. С. 829.
15. *Золотаревская Д. И.* Исследование и расчёт уплотнения почвы при работе и после остановки колёсного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 33—38.
16. *Иванов В. А., Хахина А. М., Устинов В. В., Коротков Р. К.* Уточнённые зависимости для расчёта сдвиговой деформации лесного почвогрунта по величине буксования и параметрам пятна контакта // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4 (28). С. 116—120.
17. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Особенности контактного взаимодействия трелёвочной системы с мёрзлым почвогрунтом // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106—119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106.

References

1. *Burmistrova O. N., Chemshikova Yu. M., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tambi A. A.* Theoretical substantiation of parameters of the medium-range engine of a tracked all-terrain vehicle // Systems. Methods. Technologies. 2019. No. 2 (42). Pp. 81—88. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-3-81-88. (In Russ.)
2. *Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterleva E. V., Chemshikova Yu. M.* Increased mobility of tracked and wheeled vehicles // Repair. Recovery. Modernization. 2019. No. 11. Pp. 4—10. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10. (In Russ.)
3. *Grigorev I. V., Rudov S. E.* Features of operation of wheeled forest machines in complex soil-ground and relief conditions // In the collection: Forest Engineering materials of scientific and practical conference with international participation. Yakutsk, 2018. Pp. 67—71. (In Russ.)
4. *Ageikin Ya. S.* Passability of cars. Moscow: Mechanical engineering, 1981. 232 s. (In Russ.)
5. *Saarilahti M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 p.
6. *Grigorev I. V.* Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by justifying their movement modes and technological equipment. St. Petersburg: St. Petersburg forestry Academy, 2006. 235 p. (In Russ.)
7. *Bartenev I. M., Drapalyuk M. V.* Reduction of harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings // Forest Engineering journal. 2012. No. 1 (5). Pp. 61—66. (In Russ.)
8. *Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S.* Ecological optimization of technological machines for logging. Joensuu: Joensuu University, 1998. 178 p. (In Russ.)
9. *Chahina A. M.* Methods to predict and improve cross-wheeled forest machines: Diss. doctor. Techn. Sciences'. Arkhangelsk: WITH (A)FU, 2018. 318 p. (In Russ.)
10. *Larin V. V.* Methods of predicting the reference passability of multi-axis wheeled vehicles on the ground: Diss. Doct. Techn. Science. Moscow, 2007. 530 p. (In Russ.)

11. *Peskov V. B.* Improvement of models for estimation of ruts and compaction of soils under the influence of movers of wheeled forest machines: The author's abstract Diss... Cand. Techn. Sciences'. Arkhangel'sk: S(A)FU, 2018. 20 s. (In Russ.)
12. *Zolotarevskaya D. I.* Regularities of dynamic deformation of soils under cyclic loads // *Pedology*. 2005. № 5. P. 565—574. (In Russ.)
13. *Zolotarevskaya D. I.* Change of rheological properties and density of sod-podzolic soil under dynamic loads // *Pedology*. 2010. No. 3. P. 313—323. (In Russ.)
14. *Zolotarevskaya D. I.* Changing the rheological properties and density of sod-podzolic sandy loam soil under the influence of a wheeled tractor // *Pedology*. 2013. No. 7. P. 829. (In Russ.)
15. *Zolotarevskaya D. I.* Research and calculation of soil compaction at work and after stopping the wheel tractor // *Tractors and agricultural machines*. 2016. No. 8. P. 33—38. (In Russ.)
16. *Ivanov V. A., Khakhina A. M., Ustinov V. V., Korotkov R. K.* Refined dependences for calculating the shear deformation of forest soil in terms of slip and contact spot parameters // *Systems. Methods. Technologies*. 2015. No. 4 (28). Pp. 116—120. (In Russ.)
17. *Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I.* Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2019. No. 1 (367). Pp. 106—119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106. (In Russ.)