



ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ

INFLUENCE OF THE SOIL STRESS STATE ON THE DEFORMATION MODULUS

СЕРЕДИН В.В.

Заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), д.г.-м.н., профессор, г. Пермь, nedra@nedra.perm.ru, seredin@nedra.perm.ru

СЫСОЛЯТИН С.Г.

Ассистент кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), г. Пермь, kafedra.ingeo@gmail.com

ВАГИН А.Л.

Инженер-геолог ООО НПП «Изыскатель», г. Пермь

ХРУЛЕВ А.С.

Инженер-геолог ООО НИПППД «Недра», г. Пермь, nedra@nedra.perm.ru

SEREDIN V.V.

Head of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection of the Geology Faculty of Perm State National Research University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), professor, Perm, nedra@nedra.perm.ru, seredin@nedra.perm.ru

SYSOLYATIN S.G.

Assistant of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection of the Geology Faculty of Perm State National Research University, Perm, kafedra.ingeo@gmail.com

VAGIN A.L.

Geological engineer of the «Izyskatel'» LLC research and production company, Perm

KHRULEV A.S.

Geological engineer of the «Nedra» LLC research, design and production company for nature conservation activities, Perm, nedra@nedra.perm.ru

Ключевые слова:

напряженное состояние грунтов; модуль деформации; суглинки.

Key words:

soil stress state; deformation modulus, loam.

Аннотация

Изучено влияние напряженного состояния грунтов на их модули общей деформации при оценке инженерно-геологических условий территории нефтяного месторождения с использованием методов компрессионного и трехосного сжатия, а также штамповых испытаний. Модуль деформации грунтов, полученный стабилометрическим способом, возрастал с увеличением главных горизонтальных напряжений для мягко- и тугопластичных суглинков. Для текучепластичных суглинков этих связей установить не удалось. При штамповых испытаниях модуль деформации также возрастал с увеличением главных горизонтальных напряжений для мягко- и тугопластичных суглинков. Для текучепластичных суглинков наблюдалась инверсия: с увеличением главных горизонтальных напряжений модуль деформации уменьшался. Рассчитаны уравнения связи между модулем деформации и главными горизонтальными напряжениями для исследованных грунтов. Авторы указывают, что в сложных инженерно-геологических условиях следует проводить штамповые или стабилометрические исследования по определению модуля общей деформации.

Abstract

Influence of the soil stress state on the total deformation modulus was investigated at assessment of engineering-geological conditions of an oil field using the methods of compression and triaxial compression as well as stamp testing. The deformation modulus of high-plastic and low-plastic loams obtained by the stabilometric method grew with increasing the main horizontal stresses. Such relations were not revealed for very soft loams. At stamp tests the deformation modulus also grew with increasing the main horizontal stresses for high-plastic and low-plastic loams. Inversion was observed for very soft loams, i.e. the deformation modulus decreased with increasing the main horizontal stresses. Equations of relation between the deformation modulus and the main horizontal stresses were calculated for the investigated soils. The authors point out that stamp or stabilometric investigations to determine the total deformation modulus should be performed in difficult engineering-geological conditions.

Введение

Деформационные свойства являются одними из важнейших характеристик грунтовых массивов. Показатели деформационных свойств грунтов, прежде всего модуль общей деформации, используются при расчетах осадок инженерных объектов, входят во многие расчетные схемы. Поэтому получение надежной и достоверной информации по модулю общей деформации является достаточно важной задачей. Решением

данной проблемы занимались многие ученые — И.В. Архангельский [1], Г.Г. Болдырев [2], Р.С. Зиангиров [3], Ю.Б. Текучев [13] и др. Однако, как показали их исследования, численные значения модуля деформации, полученные разными методами, не всегда сопоставимы между собой. Это обусловлено, с одной стороны, сложным строением объекта исследований (грунтового массива), с другой — ограниченностью моделей, отражающих работу системы «грунтовой массив — инженерное сооружение», и методов опре-



Таблица 1

Компрессионный модуль деформации E_k								
Суглинок	E_k , МПа						Среднее значение E_k , МПа	Коеф. вариации, %
	5,8	5,5	5,8	7,0	6,0	6,5		
Текучепластичный	5,8	5,5	5,8	7,0	6,0	6,5	5,8	8
Мягкопластичный	18,9	12,2	16,3	14,8	17,8	18,1	12,7	40
Тугопластичный	18,0	20,7	19,8	20,3	28,8	22,0	21,2	5

деления модуля деформации. Для разработки методики получения надежной информации необходимо накопить достаточный экспериментальный материал, на его основании выявить закономерности формирования модуля деформации и, как следствие, разработать методы его определения. Поэтому целью данной работы является изучение влияния напряженного состояния грунтов на их модули деформации.

Методика исследований

Методика исследований включала в себя оценку инженерно-геологических условий территории нефтяного месторождения. Изучение модуля деформации производилось методом компрессионного и трехосного сжатия согласно ГОСТ 12248-2010, а также по данным штамповых испытаний по ГОСТ 20276-2012. Обработка полученной информации производилась с использованием вероятностно-статистических методов [8].

Оценка инженерно-геологических условий

Участок изысканий расположен в Ухтинском районе Республики Коми. В геологическом строении площадки принимают участие четвертичные озерно-аллювиальные и ледниково-морские отложения, подстилаемые верхнедевонскими породами. В соответствии с полевым описанием грунтов и данными лабораторных исследований на участке выделены следующие инженерно-геологические элементы:

- ИГЭ-1 — полутвердый суглинок, имеющий природную влажность $W = 0,195$, показатель текучести $I_L = 0,182$, плотность $\rho = 2,01$ г/см³, коэффициент пористости $e = 0,608$;
- ИГЭ-2 — тугопластичный суглинок с $W = 0,216$; $I_L = 0,382$; $\rho = 1,98$ г/см³; $e = 0,661$;
- ИГЭ-3 — мягкопластичный суглинок с $W = 0,246$; $I_L = 0,629$; $\rho = 1,98$ г/см³; $e = 0,699$;
- ИГЭ-4 — текучепластичный суглинок с $W = 0,247$; $I_L = 0,846$; $\rho = 1,94$ г/см³; $e = 0,769$.

Объектами дальнейшего исследования стали тугопластичные (ИГЭ-2), мягкопластичные (ИГЭ-3) и текучепластичные (ИГЭ-4) суглинки.

Результаты исследований методом компрессионного сжатия

Испытания методом компрессионного сжатия проводились на настольном компрессионном приборе КПр-1М (производства ООО «УЭРМЗ») без возмож-

ности бокового расширения грунта. Высота исследуемого образца составила 25 мм, диаметр — 87,4 мм.

Расчет компрессионного модуля общей деформации E_k производился по формуле:

$$E_k = (\Delta p / \Delta \epsilon) \cdot \beta, \quad (1)$$

где Δp — интервал давления на образец грунта, $\Delta p = p_2 - p_1 = 0,2 - 0,1 = 0,1$ МПа; $\Delta \epsilon$ — изменение относительной вертикальной деформации образца грунта, соответствующее Δp ; β — коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе, для суглинка $\beta = 0,6$.

Относительная вертикальная деформация образца грунта определяется по зависимости:

$$\Delta \epsilon = \Delta h / h, \quad (2)$$

где h — начальная высота образца, мм; Δh — его абсолютная вертикальная деформация.

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований по определению компрессионного модуля деформации.

Результаты исследований методом трехосного сжатия

При испытаниях использовался стабилометр конструкции МП «Геотек» в условиях $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (где σ_1 — максимальное главное вертикальное напряжение, σ_2 и σ_3 — соответственно промежуточное и минимальное главное горизонтальное напряжение). Исследования проводились в три цикла:

- при $\sigma_2 = 0,1$ МПа;
- при $\sigma_2 = 0,2$ МПа;
- при $\sigma_2 = 0,3$ МПа.

Расчет модуля общей деформации $E_{ст}$ производился в диапазоне $\Delta \sigma_1 = 0,1$ МПа по зависимости:

Таблица 2

Модуль деформации $E_{ст}$, рассчитанный по данным испытаний методом трехосного сжатия						
Суглинок	$E_{ст}$, МПа, при σ_2 , МПа					
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
Текучепластичный	2,9	1,7	2,0	2,9	8,3	3,1
Мягкопластичный	13,6	17,4	21,2	20,7	26,9	23,0
Тугопластичный	9,2	21,4	46,9	35,9	37,4	49,2

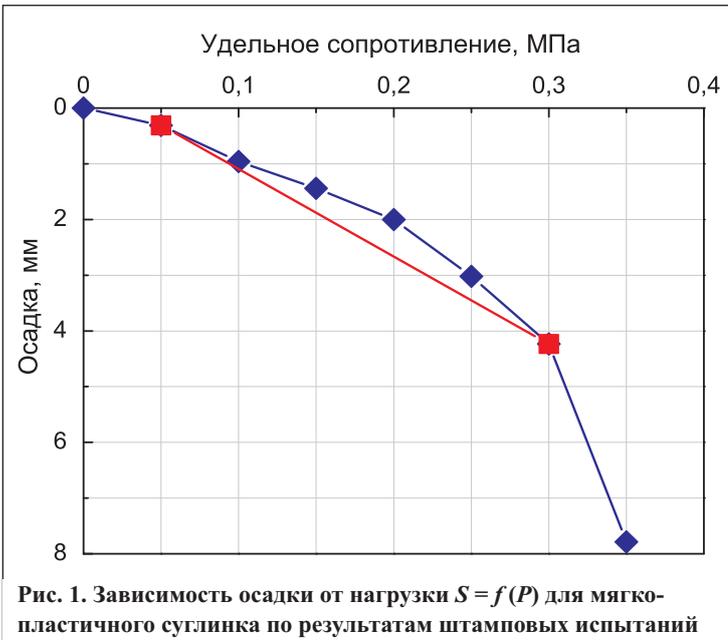


Рис. 1. Зависимость осадки от нагрузки $S = f(P)$ для мягкопластичного суглинка по результатам штамповых испытаний

$$E_{ct} = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_1, \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_1$ — приращение главного максимального вертикального напряжения в заданном диапазоне, МПа; $\Delta\varepsilon_1$ — приращение относительной вертикальной деформации, соответствующее $\Delta\sigma_1$.

В таблице 2 приведены результаты расчетов модуля деформации по данным испытаний методом трехосного сжатия.

Результаты исследований штампами

При изучении модуля общей деформации полевыми методами использовался винтовой штамп диаметром 27,68 см. Модуль деформации $E_{шт}$ рассчитывался по формуле:

$$E_{шт} = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_I \cdot D \cdot \Delta P / \Delta S, \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,35 для суглинков; K_p — коэффициент, зависящий от заглубления штампа (h/D) от поверхности грунта и принятый по таблице 5.5 ГОСТ 20276-2012 равным 0,90; h — глубина расположения штампа относительно поверхности грунта, $h = 30$ см; D — диаметр штампа, $D = 27,68$ см; K_I — коэффициент, зависящий от типа штампа и принимаемый равным 0,79 для жесткого

Таблица 3

Модули деформации $E_{шт}$ и глубина проведения опытов по результатам штамповых испытаний						
Суглинок	$E_{шт}(\text{МПа})/H(\text{м})$					
	Текучепластичный	6,2/ 4,0	5,3/ 2,5	5,8/ 6,0	-	-
Мягкопластичный	8,1/5, 0	19,2/ 8,0	8,0/3, 0	11,3/ 4,0	10,6/ 4,0	19,1/ 11,0
Тугопластичный	21,0/ 16,0	20,0/ 6,0	22,1/ 14,0	-	-	-

* H — глубина проведения опыта.

круглого штампа; ΔP — приращение давления на штамп, $\Delta P = 0,25$ МПа; ΔS — приращение осадки штампа, соответствующее ΔP , определяемое по усредняющей прямой, $\Delta S = 0,397$ см.

На рисунке 1 приведен график зависимости осадки от нагрузки $S = f(P)$ для мягкопластичного суглинка. В таблице 3 показаны результаты расчетов модуля деформации по данным штамповых испытаний.

Обсуждение результатов исследований

В таблице 1 приведены значения модуля деформации E_k , полученные компрессионным методом. Из нее видно, что текучепластичный суглинок характеризуется наименьшими значениями модуля ($E_k = 5,8$ МПа), тугопластичный — наибольшими ($E_k = 21,2$ МПа), мягкопластичный — промежуточными ($E_k = 12,7$ МПа). Следует отметить, что наибольшие изменения экспериментальных данных характерны для мягкопластичного суглинка, о чем свидетельствует наибольшее значение коэффициента вариации ($V = 40\%$).

Анализ значений модуля деформации E_{ct} , полученного при трехосных испытаниях, показывает, что между E_{ct} и главными горизонтальными напряжениями имеется взаимосвязь. С увеличением σ_2 значения E_{ct} возрастают. Для подтверждения этого был проведен корреляционный анализ [8], который показал, что между σ_2 и E_{ct} в мягко- и тугопластичных суглинках существует статистическая связь. Об этом свидетельствуют значимые положительные коэффициенты парной корреляции r . Так, расчетные коэффициенты корреляции r_p для мягкопластичных ($r_p = 0,92$) и тугопластичных ($r_p = 0,82$) суглинков больше критических ($r_k = 0,81$) при числе степеней свободы $n = 4$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$. На рисунке 2 приведен график взаимосвязи между главными горизонтальными напряжениями и модулем деформации для мягкопластичного суглинка по данным трехосных испытаний. Для текучепластичных суглинков статистических связей между σ_2 и E_{ct} установить не удалось ($r_p = 0,63$, что меньше $r_k = 0,81$), хотя тенденция сохранилась: с увеличением σ_2 модуль деформации возрастает.

С помощью регрессионного анализа были рассчитаны математические модели, позволяющие прогнозировать модуль деформации в зависимости от главных горизонтальных напряжений:

для мягкопластичного суглинка:

$$E_{ct} = 11,0 + 47,3 \cdot \sigma_2; \quad (5)$$

для тугопластичного суглинка:

$$E_{ct} = 5,3 + 140,1 \cdot \sigma_2. \quad (6)$$

Как уже указывалось, данные для модуля деформации $E_{шт}$, полученного по результатам штамповых испытаний, приведены в табл. 3. Для дальнейшего анализа величин $E_{шт}$ целесообразно дополнить данную информацию сведениями о главных горизонтальных напряжениях. Известно, что главные горизонтальные напряжения σ_2 и σ_3 связаны с глубиной залегания грунтов H и могут определяться по зависимости:



Модули деформации $E_{шт}$ и главные горизонтальные напряжения по результатам штамповых испытаний

Суглинок	$E_{шт}(\text{МПа})/\sigma_2(\text{МПа})$									
	$\sigma_2=0,1$	$\sigma_2=0,2$	$\sigma_2=0,3$	$\sigma_2=0,4$	$\sigma_2=0,5$	$\sigma_2=0,6$	$\sigma_2=0,7$	$\sigma_2=0,8$	$\sigma_2=0,9$	$\sigma_2=1,0$
Текучепластичный	6,2/0,08	5,3/0,05	5,8/0,12	8,3/0,05	8,0/0,07	11,8/0,04	-	-	-	-
Мягкопластичный	8,1/0,10	19,2/0,18	8,0/0,06	11,3/0,08	10,6/0,08	19,1/0,22	18,0/0,10	21,0/0,32	12,0/0,05	14,0/0,06
Тугопластичный	21,0/0,32	20,0/0,12	22,1/0,28	20,2/0,21	19,3/0,11	19,1/0,12	17,5/0,14	-	-	-

$$\sigma_2 = \rho \cdot H, \tag{7}$$

где ρ — плотность грунта, г/см³.

В таблице 4 вместо глубины проведения штамповых испытаний указаны значения главного горизонтального напряжения, полученные по зависимости (7). Из таблицы видно, что с увеличением σ_2 для мягко- и тугопластичных суглинков закономерно возрастают значения модуля общей деформации. На рисунке 3 представлен график взаимосвязи между главным горизонтальным напряжением и штамповым модулем деформации для мягкопластичного суглинка.

Для текучепластичного суглинка наблюдается обратная зависимость: с увеличением σ_2 модуль деформации уменьшается.

Обработка экспериментального материала вероятностно-статистическими методами [8] позволила рассчитать уравнения связи между модулем деформации $E_{шт}$ и главными горизонтальными напряжениями (σ_2). Для суглинка мягкопластичного:

$$E_{шт} = 8,7 + 43,2 \cdot \sigma_2 \tag{8}$$

при $r_p = 0,78$, что больше $r_k = 0,58$.

Статистически значимую связь между $E_{шт}$ и σ_2 для туго- и текучепластичного суглинка установить не удалось, о чем свидетельствуют незначимые коэффициенты корреляции r_p , равные соответственно 0,76 (что меньше $r_k = 0,81$) и минус 0,56 (что по модулю меньше $r_k = 0,75$).

Средние значения модуля деформации, полученные по результатам компрессионных, стабилметрических и штамповых испытаний, приведены в табл. 5. С учетом этих данных были рассчитаны поправочные коэффициенты m_k для перехода между модулями деформации, полученными разными методами (табл. 6).

Сопоставление показало, что для текучепластичного суглинка модуль деформации, полученный при

Таблица 5

Средние значения модуля деформации, полученные по результатам компрессионных (E_k), стабилметрических ($E_{ст}$) и штамповых ($E_{шт}$) испытаний

Суглинок	$\sigma_2=0,1$		$\sigma_2=0,2$		$\sigma_2=0,3$		E_k
	$E_{шт}$	$E_{ст}$	$E_{шт}$	$E_{ст}$	$E_{шт}$	$E_{ст}$	
Текучепластичный	7,9	2,3	-	2,5	-	5,7	5,8
Мягкопластичный	11,7	15,5	19,1	21,9	21,0	24,9	12,7
Тугопластичный	19,0	15,3	20,2	41,4	21,6	43,3	21,2

штамповых испытаниях, в 3,4 раза выше, чем полученный в условиях трехосного сжатия (см. табл. 6). Для мягкопластичного суглинка значения модуля деформации, полученные штамповым и стабилметрическим методами, сопоставимы между собой. Для тугопластичного суглинка при главных горизонтальных напряжениях до 0,1 МПа значения $E_{шт}$ и $E_{ст}$ сопоставимы между собой, а с увеличением σ_2 до 0,3 МПа величина $E_{ст}$ уменьшается в два раза.

Таким образом, при моделировании условий работы грунта (главных горизонтальных напряжений) в объ-

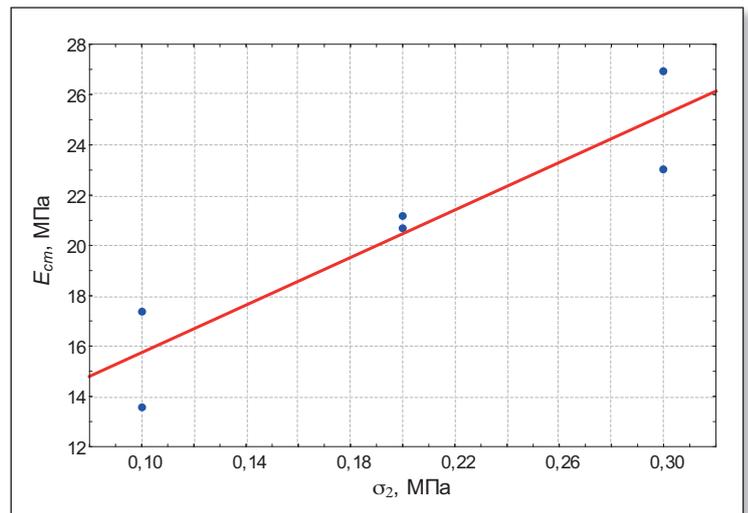


Рис. 2. Зависимость между главными горизонтальными напряжениями $\sigma_2 = \sigma_3$ и модулем деформации $E_{ст}$ для мягкопластичного суглинка по данным трехосных испытаний

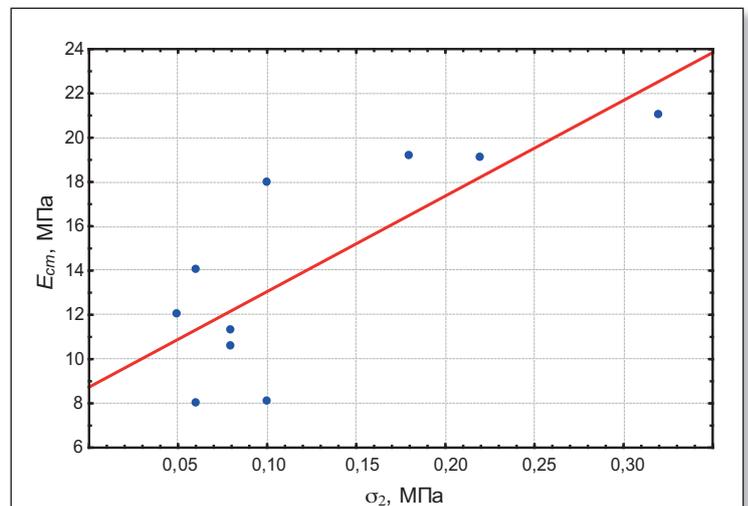


Рис. 3. Зависимость между главными горизонтальными напряжениями $\sigma_2 = \sigma_3$ и модулем деформации $E_{шт}$ для мягкопластичного суглинка по данным штамповых испытаний

Таблица 6

Поправочные коэффициенты для перехода между модулями деформации, полученными разными методами испытаний							
Суглинок	Штамповые/трехосные при σ_2 , МПа			Штамповые/компрессионные при σ_2 , МПа			Штамповые /компрессионные по СНиП 2.02.01-83*
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	
Текучепластичный	3,40	-	-	1,37	-	-	3,90
Мягкопластичный	0,75	0,93	0,84	0,92	1,50	1,65	4,25
Тугопластичный	1,24	0,49	0,50	0,90	0,95	1,03	4,48

емном напряженном состоянии можно сократить число штамповых испытаний, заменив их на стабилметрические.

Кроме того, поправочные коэффициенты, рекомендуемые СНиП 2.02.01-83* (см. табл. 6), не всегда сопоставимы с экспериментальными данными, поэтому в сложных инженерно-геологических условиях для определения модуля общей деформации рекомендуется наряду с компрессионными проводить и штамповые или стабилметрические испытания.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что модуль общей деформации грунтов, полученный стабилметрическим способом, возрастает с увеличением главных горизонтальных напряжений для мягко- и тугопластичных суглинков. В текучепластичных суглинках статистически значимой связи между σ_2 и $E_{ст}$ установить не удалось, хотя тенденция сохранилась: с увеличением главного горизонтального напряжения модуль деформации возрастает. Рассчитаны уравне-

ния связи между σ_2 и $E_{ст}$ для мягко- и тугопластичных суглинков.

2. При штамповых испытаниях мягко- и тугопластичных суглинков модуль общей деформации также возрастает с увеличением главных горизонтальных напряжений. Для текучепластичных суглинков наблюдается инверсия: с увеличением σ_2 величина $E_{ст}$ уменьшается. Рассчитаны уравнения связи между модулем деформации и главными горизонтальными напряжениями для мягкопластичных суглинков.

3. Значения модуля деформации, полученные при моделировании условий работы системы «сооружение — грунтовый массив» в стабилметре, сопоставимы с полученными при испытаниях штампом, поэтому можно сократить число штамповых испытаний, заменив их на стабилметрические.

4. Поправочные коэффициенты, рекомендуемые СНиП 2.02.01-83*, не всегда сопоставимы с полученными экспериментальным путем, поэтому в сложных инженерно-геологических условиях для определения модуля общей деформации следует проводить штамповые или стабилметрические испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельский И.В.* Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 58–64.
2. *Болдырев Г.Г., Арефьев Д.В., Гордеев А.В.* Определение деформационных характеристик грунтов различными лабораторными методами // Инженерные изыскания. 2010. № 8. С. 16–23.
3. *Болдырев Г.Г., Новичков Г.А.* Обзор методов полевых испытаний грунтов. Часть IV: Испытания плоским и винтовым штампами // Инженерные изыскания. 2011. № 3. С. 8–15.
4. *Зиангиров Р.С., Кошелев А.Г.* Определение модуля деформации грунтов методом нагружения штампа // Инженерные изыскания. 2010. № 2. С. 26–31.
5. *Середин В.В.* Исследование влияния вязкости поровой жидкости (углеводородов) на прочностные свойства песков // Инженерная геология. 2014. № 4. С. 45–48.
6. *Середин В.В.* Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–12. С. 2713–2717.
7. *Середин В.В.* К вопросу о прочности засоленных глинистых грунтов // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 66–69.
8. *Середин В.В.* Математические методы в гидрогеологии и инженерной геологии: курс лекций. Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 2011. 122 с.
9. *Середин В.В.* Способ построения паспортов прочности горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1985. № 5. С. 110.
10. *Середин В.В., Андрианов А.В.* К вопросу о методике определения прочностных характеристик грунтов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 946.
11. *Середин В.В., Ядзинская М.Р.* Закономерности изменений прочностных свойств глинистых грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Инженерная геология. 2014. № 2. С. 26–32.
12. *Середин В.В., Ядзинская М.Р.* Исследования механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–6. С. 1408–1412.
13. *Текучев Ю.Б., Коначинская Е.П.* О полевых испытаниях грунтов штампами малой площади // Инженерные изыскания. 2010. № 8. С. 24–25.