

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81>**РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ
ЛЁССОВОЙ СУБФОРМАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ Г. КРАСНОДАРА**

Научная статья

Хансиварова Н.М.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-4494-7493;¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (n.khansivarova[at]yandex.ru)

Аннотация

В основу статьи положены данные о содержании и свойствах дисперсных связных просадочных пород четвертичного возраста, слагающих территорию г. Краснодара. Обоснована важная роль пластичных свойств в формировании надежности дисперсных связных пород, как оснований зданий и сооружений. Выполнена статистическая обработка 2000 частных значений природной влажности и показателей пластичности, полученных лабораторными методами. Проведен сравнительный анализ некоторых статистических характеристик с имеющимися данными 80-х годов прошлого столетия. Методами парной и множественной корреляции выявлены и показаны наиболее существенные взаимосвязи показателей пластичности между собой и природной влажностью. По результатам регрессионного анализа представлены и рекомендованы к практическому применению формулы для расчета показателей пластичности, которые учитывают региональные особенности дисперсных связных грунтов г. Краснодара. Проведенные исследования позволят сократить виды, объемы, сроки выполнения лабораторных работ, сократить финансовые и трудовые затраты без снижения качества инженерно-геологической информации.

Ключевые слова: природная влажность, показатели пластичности, корреляционно-регрессионный анализ.**THE RESULTS OF THE CORRELATION AND REGRESSION ANALYSIS OF THE STUDY OF THE
RELATIONSHIPS OF PLASTICITY INDICES OF DISPERSED QUATERNARY SUBSIDENCE SOILS OF THE
LOESS SUBFORMATION WITHIN THE TERRITORY OF KRASNODAR**

Research article

Khansivarova N.M.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-4494-7493;¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (n.khansivarova[at]yandex.ru)

Abstract

The article is based on data on the content and properties of dispersed cohesive subsidence rocks of Quaternary age composing the territory of Krasnodar. The important role of plastic properties in the formation of reliability of dispersed cohesive rocks as foundations of buildings and structures is substantiated. Statistical processing of 2000 partial values of natural humidity and plasticity indicators obtained by laboratory methods was performed. A comparative analysis of some statistical characteristics with the available data of the 80s of the last century has been carried out. By the methods of paired and multiple correlation, the most significant interrelations of plasticity indicators between themselves and natural humidity have been identified and shown. According to the results of regression analysis, formulas for calculating plasticity indicators that take into account the regional characteristics of dispersed cohesive soils of Krasnodar are presented and recommended for practical use. The conducted research will reduce the types, volumes, and terms of laboratory works, decrease financial and labour costs without reducing the quality of engineering-geological information.

Keywords: natural moisture content, plasticity indices, correlation and regression analysis.**Введение**

Надежность дисперсных просадочных пород, как оснований зданий и сооружений, в значительной степени определяются их пластическими свойствами. Имеются публикации, в которых для прогноза, например, просадочных свойств в список приоритетных переменных включены характеристики пластичности и консистенции [1], [2], [3], [4]. Известно, что грунт проявляет пластичность т.е. изменяет форму под действием внешней нагрузки без разрушения структуры, только в определенном диапазоне влажности. В инженерной геологии используют три показателя пластичности: нижний, верхний пределы и число пластичности. Первые два показателя определяются прямыми лабораторными методами в соответствие с ГОСТ [5]. Число пластичности представляет собой разницу между ними. По сути, характеристика пластичных свойств грунта сводятся к определению двух параметров влажности – минимальной, которая дает возможность частицам твердой фазы свободно перемещаться друг относительно друга и максимальной, при которой грунт еще находится в пластичном состоянии, но готов перейти в текучее. Это состояние соответствует разрушению большей части структурных связей между частицами твердой фазы. Таким образом, нижний предел пластичности представляет собой начальную стадию образования слабосвязанной осмотической воды, а верхний предел демонстрирует постепенное увеличение количества свободной воды [6]. Достижение верхнего

предела пластичности свидетельствует о максимальном содержании всех категорий воды при сохранении возможности пока еще рассматривать грунт как твердое тело. В дисперсных грунтах жидкая компонента является важнейшим фактором, контролирующим взаимодействие между фазами на границе «минерал – вода» и, как следствие, влияющим практически на все свойства дисперсных пород.

На сегодняшний день, в практике грунтоведения для расчета большинства характеристик грунтов применяется несколько известных формул, которые представляют собой обобщенные зависимости между некоторыми свойствами. Такие зависимости не учитывают региональных особенностей грунтов, а между тем горные породы разных регионов формировались в разных природных условиях, имеют разную историю геолого-литологического развития, что обуславливает весьма существенные различия в составе, состоянии и свойствах грунтовых массивов. Считаем, что одной из основных задач современного грунтоведения является поиск новых региональных зависимостей, которые учитывали бы особенности геолого-исторической эволюции грунтов, а это, в свою очередь, привело к возможности выявления и учета их уникальных региональных свойств, необходимых для расчетов оснований и фундаментов. Обозначенная задача вполне разрешима с привлечением огромного накопленного информационного ресурса по результатам инженерно-геологических изысканий для строительства объектов различного назначения. Нами, в качестве примера выбран г. Краснодар – крупный краевой центр юга России.

Объектом исследования являются дисперсные связные грунты, обладающие специфическими просадочными свойствами Азово-Кубанского краевого прогиба – части Индоло-Кубанского предгорного прогиба [7].

Цель исследований: на основе обработки массива данных, полученных при выполнении инженерно-геологических изысканий на 200 площадках г. Краснодара, вывести расчетные формулы для определения показателей пластичности. Это позволит сократить финансовые затраты, а также сроки выполнения лабораторных исследований дисперсных грунтов и обеспечит возможность учета особенностей состава, состояния и свойств грунтов, слагающих территорию г. Краснодара.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Проведена статистическая обработка результатов лабораторных испытаний дисперсных связных посадочных грунтов и определены основные статистические характеристики влажности и пластичности.
2. Для выявления зависимостей между содержанием жидкой компоненты и пластическими свойствами, а также, между показателями пластичности дисперсных пород выполнена парная и множественная корреляция.
3. Для прогноза изменения характеристик пластичности применен регрессионный анализ, по результатам которого построены модели парной и множественной линейной регрессии.

Для выполнения настоящих исследований применялись лабораторные методы определения влажности, верхнего и нижнего пределов пластичности дисперсных грунтов в соответствии с принятыми методиками ГОСТ [5]; методы математической статистики с привлечением корреляционно-регрессионного анализа. Статистический анализ данных лабораторных испытаний грунтов, построение регрессионных линейных моделей выполнены с помощью пакета «Анализ данных» программы «Excel».

Основные результаты

Краснодар — административный центр Краснодарского края, расположен на Европейской части юга России, в пределах Кубано-Приазовской низменности, на правом берегу р. Кубань. В геолого-тектоническом отношении район г. Краснодар расположен в переходной зоне между складчатым сооружением Большого Кавказа и эпигерцинской Скифской плиты (молодой платформы) с интенсивно дислоцированным герцинским складчатым основанием и мезокайнозойским чехлом. По геоморфологическим условиям исследуемая территория приурочена к провинции Предкавказья, области аккумулятивных равнин Кубанской впадины, району аллювиальных четвертичных равнин и террас низовий Кубани с покровом лессов [8]. По климатическим условиям, принятым для строительства, г. Краснодар относится к району III Б [9]. Сейсмичность территории составляет – 7 баллов [10]. Согласно инженерно-геологическому районированию, дисперсные четвертичные грунты города Краснодара приурочены к лёссовой субформации прикубанских степей Западного Предкавказья [7]. В соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2020 г. они представлены классом дисперсных, относятся к подклассу связных, по типу – к осадочным, по виду – к минеральным, по подвиду – к глинистым грунтам [11].

В статистическую обработку включены следующие показатели свойств грунтов: глубина отбора проб H (м), природная влажность грунта W (д.ед.), влажность на границе текучести W_L (д.ед.), влажность на границе раскатывания W_p (д.ед.), число пластичности I_p (д.ед.). Генеральная совокупность представлена 2000 частных значений перечисленных показателей. Результаты статистической обработки и основные статистические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты статистической обработки показателей природной влажности и пластичности просадочных грунтов г. Краснодара

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81.1>

Статистические характеристики	Влажность природная W , д.е.	Верхний предел пластичности, д.е. W_L	Нижний предел пластичности, д.е. W_p	Число пластичности I_p
Среднее значение	<u>0,19</u> 0,18	<u>0,34</u> 0,36	<u>0,22</u> 0,22	<u>0,12</u> 0,13
Стандартная	0,0007	0,001	0,0008	0,0009

Статистические характеристики	Влажность природная W , д.е.	Верхний предел пластичности, д.е. W_L	Нижний предел пластичности, д.е. W_p	Число пластичности I_p
ошибка				
Медиана	0,19	0,34	0,22	0,12
Мода	0,2	0,36	0,23	0,13
Стандартное отклонение	0,027	0,0485	0,0280	0,032
Дисперсия выборки	0,00076	0,0023	0,00078	0,001
Эксцесс	0,596	0,4715	0,4099	0,6065
Асимметрия	-0,33742699	-0,3094	-0,2105	0,2330
Минимум	<u>0,06</u> 0,11	<u>0,18</u> 0,21	<u>0,13</u> 0,16	<u>0,02</u> 0,07
Максимум	<u>0,29</u> 0,30	<u>0,49</u> 0,54	<u>0,33</u> 0,30	<u>0,24</u> 0,26

Примечание: в числителе приведены результаты исследований, проведенных автором; в знаменатели – данные исследований 1985 г [7]

Для всех представленных характеристик свойств средние значения и медиана совпадают, что демонстрирует симметричное и равномерное распределение частных значений вокруг среднего. Наиболее повторяющиеся значения в выборке незначительно отличаются от средних значений. Получены низкие величины стандартных отклонений и стандартной ошибки по всем показателям, что свидетельствует о слабой изменчивости свойств грунтов. Отмечается наибольшая стабильность для влажности W и нижнего предела пластичности W_p . Для этих же показателей зафиксированы минимальные значения эксцесса, который имеет положительное значение для всех характеристик. Это указывает на расположение частных значений в середине вариационного ряда и на сжатую форму кривых распределения. Коэффициенты асимметрии большинства показателей отрицательны т.е. распределение отклоняется в сторону меньших значений. Исключение составляет число пластичности I_p .

Сравнение с ранее полученными данными, показало, что за сорок лет интенсивного строительного освоения территории г. Краснодара, существенных изменений природной влажности и пластичности грунта не произошло. Можно отметить заметное снижение минимальных значений по всем показателям: числа пластичности I_p – на 71%; природной влажности W – на 45%; нижнего предела пластичности W_p – на 19%; верхнего W_L – на 14%; Подобные изменения могут быть связаны с влиянием зональных факторов инженерно-геологических условий, а именно, климата, формирующего более засушливый режим. С позиций грунтоведения, уменьшения минимальных значений демонстрирует, что в настоящее время, переход грунта в пластичное состояние может осуществляться при более низких значениях влажности. Кроме того, выявлено снижение на 8-9% максимальных значений влажности на границе раскатывания W_L и числа пластичности I_p при увеличении максимума показателей влажности на пределе раскатывания W_p , в этих же пределах.

Второй этап исследований был направлен на оценку тесноты связи показателей изучаемых свойств грунта по результатам корреляционного анализа. Очень высокие корреляционные связи отмечаются между пределами пластичности W_p и W_L (рис. 1); а также, между верхним пределом W_L и числом пластичности I_p (рис. 2).

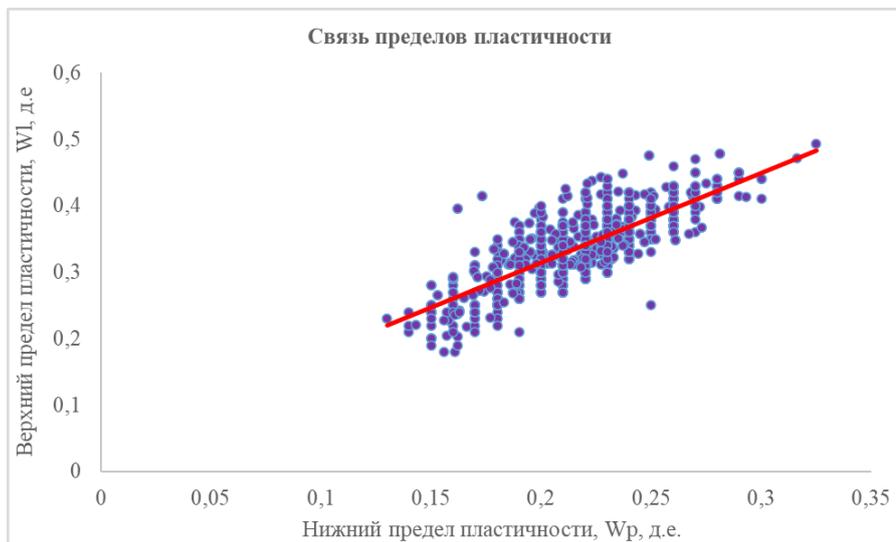


Рисунок 1 - Взаимосвязь верхнего и нижнего пределов пластичности
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81.2>

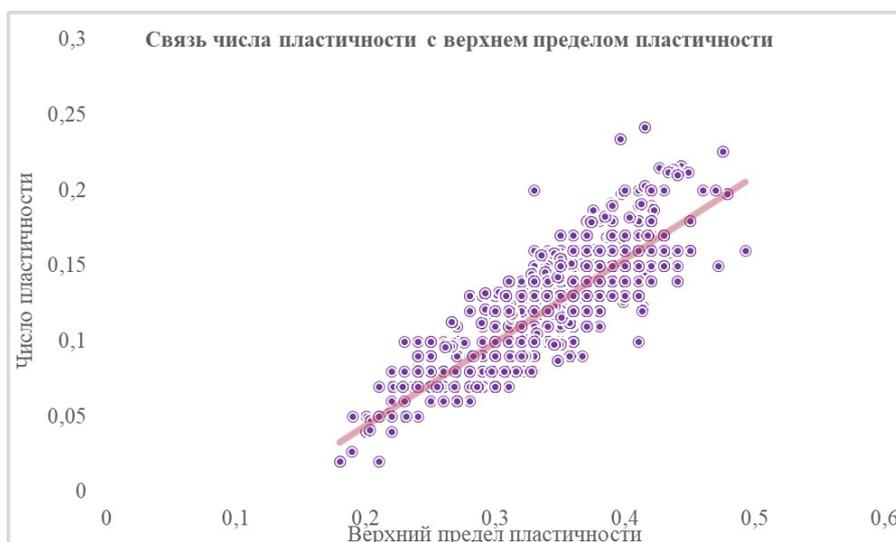


Рисунок 2 - Взаимосвязь верхнего и нижнего пределов пластичности
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81.3>

Парные и множественные коэффициенты корреляции имеют положительные значения и составляют 0,78 – 0,81 и 0,83 соответственно. Полученные нами значения, в целом, согласуются с данными других авторов. Установленные ими коэффициенты корреляции между W_L и W_p изменяются от 0,465 до 0,850 [1], [3], [12], [13].

Нами, при выполнении парной корреляции, выявлена высокая положительная связь между влажностью и пределами пластичности. Следует отметить, что по величинам коэффициентов множественной корреляции, зависимости между данными показателями оцениваются, как средние.

Наблюдается резкое снижение парных и множественных коэффициентов корреляции в ряду: «число пластичности → нижний предел» и «число пластичности → влажность». Тем не менее, данные взаимосвязи не относятся к слабым, а оцениваются, как средние. Отсутствие тесной связи между числом пластичности и влажностью на границе раскатывания отмечается во всех проанализированных нами работах. Они содержат сведения о том, что упомянутые коэффициенты находятся в пределах 0,2–0,5 [1], [2], [12], [13]. Нами получено значение 0,294. Большинство авторов объясняют отсутствие значимой связи ошибками при определении W_p , а также субъективностью самого метода. Мы частично разделяем данное мнение, однако считаем необходимым внести дополнение. Начало проявления пластичности обусловлено, в основном, повышением количества слабосвязанной (переходной) воды, одной из разновидностей, которой, является осмотическая. Она формируется на границе «минерал – вода» под влиянием электроповерхностных явлений, а ее содержание зависит от строения ДЭС и степени раскрытия диффузного слоя (слоя Гуи) [6]. На сегодняшний день, доступные и простые методики определения толщины диффузного слоя не разработаны, поэтому в практике грунтоведения используют теоретически слабо обоснованный показатель влажности на границе раскатывания. Считаем, что назрела необходимость разработки новых методов определения нижнего предела пластичности W_p .

Возвращаясь к результатам корреляционного анализа, представляется перспективным поиск новых функциональных зависимостей для всех показателей пластичности с использованием парной и множественной линейной регрессии. В таблице 2 приведены наиболее значимые зависимости между показателями свойств, полученные по результатам множественного и парного регрессионного анализа.

Таблица 2 - Линейные модели парной и множественной регрессии показателей пластичности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81.4>

	Уравнение регрессии	Множественный R	R-квадрат	Стандартная ошибка	Остатки RSS
1	$W_L = 0,02 + 0,27W + 1,21W_p$	0,79	0,62	0,03	1,05
2	$W_L = 0,04 + 1,33W_p$	0,77	0,59	0,03	1,17
3	$W_p = 0,06 + 0,44W_L$	0,77	0,59	0,02	0,39
4	$I_p = 0,56W_L - 0,07$	0,83	0,69	0,02	0,4

В качестве зависимых переменных поочередно выбирались все показатели пластичности, а в число независимых поэтапно, включались характеристики пластичности и природная влажность W . Множественная регрессия показала, что наиболее значимой является зависимость верхнего предела пластичности W_L от природной влажности W и нижнего предела раскатывания W_p . Множественный R равен 0,779 т.е. связь между показателями тесная. Значение R-квадрата или коэффициента детерминации составляет 0,626, а это означает, что 62,6% вариаций верхнего предела пластичности W_L можно объяснить количеством всех категорий жидкой компоненты в грунте: от слабосвязанной (переходной) осмотической до свободной. Стандартная ошибка мала – 0,030, что позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемые значения верхнего предела пластичности W_L отклоняются от линии регрессии в среднем на 0,030 единицы. Анализ сумм квадратов остатков (RSS) дают основание заключить, что полученные уравнения регрессии корректны и могут применяться для расчета показателей пластичности. Однако наиболее достоверными являются зависимости (3) и (4), что подтверждается высокими коэффициентами корреляции и малыми величинами остатков.

Известны попытки многих российских и зарубежных исследователей поиска новых функциональных зависимостей отдельных показателей пластичности между собой и природной влажности W , например, имеются линейные уравнения множественной и парной регрессии для расчета числа пластичности I_p с использованием верхнего предела пластичности W_L . Такие формулы получены для грунтов прибрежной части дельты р. Миссисипи (Б. Макклеланд, 1967); терригенных морских илов (А.Б. Шпиков, 1980); плиоцен-плейстоценовые озерные глины Центральной Италии (А. Кончелли, 1981); современных илов Атлантического океана (А.Ф. Ричардс, 1962). Для нас, наибольший интерес представляют уравнения регрессии, рекомендованные в разные годы Галаем Б.Ф., а также, сотрудниками ВостСибирТИСИЗ г. Иркутска. Краткие сведения приведены в таблице 3 [12], [13], [14].

Таблица 3 - Зависимости числа пластичности от предела текучести W_L DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.81.5>

Уравнение	Период и авторы	Регион и количество определений
$I_p = 0,75W_L - 0,11$	70-е годы 20 века, Галай Б.Ф.	Ставрополье, г. Ростов-на-Дону, (20000)
$I_p = 0,8W_L - 0,14$	70-е годы 20 века, Галай Б.Ф.	Глины различного генезиса (75), морские илы и покровные отложения (62), лёссовые грунты Северного Кавказа (51), моренные и лёссовые отложения (250)
$I_p = 0,599W_L - 0,079$	70-е годы 20 века, ВостСибТИСИЗ	Элювиальные глинистые отложения юга Восточной Сибири (125)

Примечание: по результатам предыдущих исследований

Данные таблиц 2 и 3 показывают, что полученная нами зависимость числа пластичности I_p и влажности на границе текучести W_L практически полностью согласуется с результатами Восточно-Сибирского треста инженерно-строительных изысканий (г. Иркутск).

Заключение

1. Для всех показателей пластичных свойств установлены: симметричное и равномерное распределение частных значений вокруг среднего; наиболее повторяющееся значение отличаются от средних на небольшую величину; небольшая изменчивость, что подтверждается малыми величинами стандартных отклонений и стандартных ошибок; эксцесса имеет положительное значение. Коэффициенты асимметрии отрицательны, кроме числа пластичности I_p . Таким образом, все переменные имеют распределение, близкое к нормальному.

2. Сравнение пластических свойств и влажности просадочных грунтов, залегающих на территории г. Краснодара с исследованиями 80-х годов 20 века, существенных изменений не выявило. Следует отметить, снижение минимальных значений по всем показателям от 14 до 71%, что, по нашему мнению, свидетельствует об изменении грунтового режима в сторону осушения. Кроме того, зафиксированные изменения могут указывать на возможность перехода грунтов в пластичное состояние при более низких значениях влажности.

3. Корреляционный анализ выявил практически все типы связей показателей пластичности между собой и влажностью, кроме слабых. Очень высокие положительные связи установлены для пределов пластичности; а также между верхним пределом W_L и числом пластичности I_p . Высокая положительная парная связь наблюдается между влажностью W и пределами пластичности. По результатам множественной корреляции, данная связь оценивается, как средняя. Сопоставление с работами, выполненными ранее, показало, что, в целом, представленная автором информация, согласуется с выводами всех изученных работ. Особого внимания заслуживает уравнение, выведенное автором для расчета числа пластичности I_p с использованием верхнего предела пластичности W_L . Оно практически полностью совпадает с аналогичной зависимостью, полученной сотрудниками Восточно-Сибирского треста инженерно-строительных изысканий г. Иркутска для элювиальных глинистых отложений Монголо-Сибирского региона.

4. Настоящие исследования подтвердили, установленные многими авторами существенное уменьшение тесноты связей между числом пластичности I_p и нижним пределом W_p , а также, числом пластичности I_p и влажностью W . В большинстве работ данный факт объясняется ошибками при определении W_p и субъективностью метода. Считаем, что нижний предел пластичности W_p , по сути представляет собой количество слабосвязной осмотической воды, теоретически рассматриваемой, как диффузная часть ДЭС. На сегодняшний день не существует методов измерения толщины гидратных оболочек. По нашему мнению, разработка новых методов определений данного показателя должна основываться на изучении содержания глинистой фракции, поскольку, именно глинистые минералы в наибольшей степени участвуют в образовании ДЭС. Другой пути решения данной проблемы – поиск новых функциональных зависимостей свойств, определяемых прямыми лабораторными испытаниями.

5. Разработанные автором уравнения регрессии могут быть использованы для практического применения при лабораторных исследованиях пластичности дисперсных связных просадочных грунтов, залегающих на территории г. Краснодара. Представленные уравнения позволяют рассчитать показатели пластичности с использованием только одного из них, определенного прямыми лабораторными методами. Это позволит сократить объем лабораторных работ, финансовые и трудовые затраты, а также повысить надежность результатов инженерно-геологических изысканий, которые будут учитывать региональные особенности грунтовых толщ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Шпильборг И. Просадочные свойства лёссовых пород центрального и северо-восточного Предкавказья и их характеристика по прямым и косвенным показателям / И. Шпильборг, А.Н. Хуртин // Инженерно-геологические свойства лёссовых пород. — М., 1966. — С. 35–36.
2. Хайме Н.М. Количественная оценка относительной просадочности лёссовых пород по комплексу косвенных признаков с помощью методов многомерного статистического анализа / Н.М. Хайме, В.А. Пырченко // Труды ПНИИИС. — 1974. — Вып. 26. — С. 138–148.
3. Текучев Ю.Б. Происхождение лёссовых пород и их просадочности / Ю.Б. Текучев, Л.И. Бондарева. — Новочеркасск: Набл, 2005. — 152 с.
4. Галай Б.Ф. Литогенез и просадочность эоловых лёссов: (На прим. Центрального Предкавказья): автореф. канд. дисс. ... д-ра геол.-минер. наук / Галай Борис Федорович. — М.: МГУ, 1992.
5. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2015. — 23 с.
6. Трофимов В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский; под ред. В.Т. Трофимова. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.

7. Черкасов М.И. Инженерно-геологическое районирование Северного Кавказа / М.И. Черкасов. — Ростов-на-Дону: Изд-во ростовского университета, 1985 — 155 с.
8. Сафронов И.Н. Геоморфология Северного Кавказа / И.Н. Сафронов. — Ростов-на-Дону, 1969. — 221 с.
9. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. — М., 2006. — 74 с.
10. СП 14.13330.2014 (карта А ОСР-15) с изм. — № 1.
11. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2020. — 41 с.
12. Галай Б.Ф. Корреляционные зависимости между показателями пластичности глинистых грунтов / Б.Ф. Галай // Известия вузов. Геология и разведка. — 1978. — № 8. — С. 100–103.
13. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / Т.Г. Рященко. — Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. — 287 с.
14. Галай Б.Ф. Использование границы текучести глинистых грунтов для характеристики их пластичности / Б.Ф. Галай // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1974. — № 4.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Shpil'borg I. Prosadochnye svojstva ljossovyh porod central'nogo i severo-vostochnogo Predkavkaz'ja i ih harakteristika po prjamym i kosvennym pokazateljam [Subsidence properties of loess rocks of the central and north-eastern Pre-Caucasus and their characterisation by direct and indirect indicators] / I. Shpil'borg, A.N. Xurtin // Inzhenerno-geologicheskie svojstva ljossovyh porod [Engineering-geological Properties of Loess Rocks]. — М., 1966. — P. 35–36. [in Russian]
2. Hajme N.M. Kolichestvennaja ocenka odnositel'noj prosadochnosti ljossovyh porod po kompleksu kosvennyh priznakov s pomoshh'ju metodov mnogomernogo statisticheskogo analiza [Quantitative assessment of relative subsidence of loess rocks by a set of indirect signs using multivariate statistical analysis methods] / N.M. Hajme, V.A. Pyrchenko // Trudy PNIIS [Proceedings of PNIIS]. — 1974. — Iss. 26. — P. 138–148. [in Russian]
3. Tekuchev Ju.B. Proishozhdenie ljossovyh porod i ih prosadochnosti [Origin of loess rocks and their subsidence rates] / Ju.B. Tekuchev, L.I. Bondareva. — Novocherkassk: Nabla, 2005. — 152 p. [in Russian]
4. Galaj B.F. Litogenez i prosadochnost' jeolovyh ljossov: (Na prim. Central'nogo Predkavkaz'ja) [Lithogenesis and subsidence of aeolian loesses: (On the example of the Central Pre-Caucasus)]: abst. diss. ... PhD in Geological and Mineral Sciences / Galaj Boris Fedorovich. — М.: MSU, 1992. [in Russian]
5. GOST 5180-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fizicheskikh harakteristik [GOST 5180-2015. Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics]. — М.: Standartinform, 2015. — 23 p. [in Russian]
6. Trofimov V.T. Gruntovedenie [Soil Studies] / V.T. Trofimov, V.A. Korolev, E.A. Voznesenskij; ed. by V.T. Trofimov. — М.: MSU Publishing House, 2005. — 1024 p. [in Russian]
7. Cherkasov M.I. Inzhenerno-geologicheskoe rajonirovanie Severnogo Kavkaza [Engineering-geological zoning of the North Caucasus] / M.I. Cherkasov. — Rostov-on-Don: Rostov University Publishing House, 1985 — 155 p. [in Russian]
8. Safronov I.N. Geomorfologija Severnogo Kavkaza [Geomorphology of the North Caucasus] / I.N. Safronov. — Rostov-on-Don, 1969. — 221 p. [in Russian]
9. SP 131.13330.2012. Stroitel'naja klimatologija [SSP 131.13330.2012. Construction climatology]. — М., 2006. — 74 p. [in Russian]
10. SP 14.13330.2014 (karta A OSR-15) s izm. [SP 14.13330.2014 (Map A OSR-15) with amendments] — № 1. [in Russian]
11. GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikacija [GOST 25100-2020. Soils. Classification]. — М.: Standartinform, 2020. — 41 p. [in Russian]
12. Galaj B.F. Korreljacionnye zavisimosti mezhdju pokazateljami plastichnosti glinistyh gruntov [Correlation dependences between plasticity indices of clayey soils] / B.F. Galaj // Izvestija vuzov. Geologija i razvedka [Proceedings of Universities. Geology and Exploration]. — 1978. — № 8. — P. 100–103. [in Russian]
13. Rjashhenko T.G. Regional'noe gruntovedenie (Vostochnaja Sibir') [Regional soil science (Eastern Siberia)] / T.G. Rjashhenko. — Irkutsk: Irkutsk: Publishing House IZK SB RAS, 2010. — 287 p. [in Russian]
14. Galaj B.F. Ispol'zovanie granicy tekuchesti glinistyh gruntov dlja harakteristiki ih plastichnosti [Use of the yield boundary of clayey soils to characterise their plasticity] / B.F. Galaj // Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov [Bases, Foundations and Soil Mechanics]. — 1974. — № 4. [in Russian]