

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ГРАФИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕДУПЛОТНЕНИЯ

В.В. Матвеев^{1,2}, В.В. Шанина²

¹ Geotechnical Graduate Lab, г.Москва, E-mail: v.matveev@geogradlab.ru

² МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г.Москва, Ленинские горы, д.1.

Введение

В настоящее время вопрос определения параметров переуплотнения грунта является весьма актуальным. Неточности в определении этих параметров влияют на точность определения напряженно-деформированного состояния.

Напряжение предуплотнения σ_c – условное максимальное эффективное напряжение на грунт за время его существования [3]. Таким образом это предельное напряжение, отделяющее «упругое» поведение грунта от «пластичного» [24]. Оценка напряжения предуплотнения σ_c обычно проводится на основе результатов компрессионных испытаний.

За последние 85 лет предложено множество различных графических методов интерпретации напряжения предуплотнения [4, 6]. Однако методы интерпретации, предложенные различными исследователями, могут давать существенно отличные друг от друга результаты [15, 17, 24].

Методы, рассматриваемые в данном исследовании, опираются на зависимость характера деформирования от приложенных напряжений. Их можно поделить на три группы по принципу используемого пространства для графических построений: полулогарифмические, билогарифмические и энергетические. Краткая характеристика методов с принципами их работы представлена в табл. 1, а их графические построения на Рис. 1.

Систематизация факторов. В процессе исследования [7, 17] были выявлены различные факторы, которые приводят к неоднозначностям при графических построениях, что влияет на точность интерпретации напряжения предуплотнения. При этом выделяются две группы факторов – объективные, то есть не зависящие от оператора, проводящего графические построения, и субъективные – предполагающие любую мыслительную деятельность оператора относительно проведения графических построений (определение точек и отрезков, проведение линий, касательных и секущих, их пересечения), предварительной оценки результата и установления необходимости повторить построения.

Объективные факторы, влияющие на точность графических построений, проявляются на этапе пробоотбора, транспортировки, хранения образцов, в процессе испытания, а также последующей обработки результатов. В табл. 2 показано, как воздействующие меры объективных факторов влияют на точность построений.

Качество образцов существенно влияет на достоверность результатов испытаний. В случае образцов неудовлетворительной сохранности перегиб на компрессионной кривой от переуплотненного к нормально уплотненному состоянию грунта становится округлым и плавным, что затрудняет интерпретацию результатов. Для обеспечения высокого качества образцов следует использовать способы бурения, позволяющие отбирать монолиты, не нарушая их структуры, а также бережно их хранить и транспортировать, в соответствии с действующими стандартами [1].

Процедура реконсолидации является важным этапом испытания грунтов, позволят привести образец в состояние близкое к его природному и также частично компенсировать нарушение его структуры при пробоотборе и пробоподготовке.

Количество ступеней и их величина при статическом режиме нагружения. Для всех графических методов точность построений напрямую зависит от количества экспериментальных точек, а точность определения напряжения предуплотнения напрямую зависит от плотности точек на участке предполагаемого напряжения предуплотнения. Коэффициент приращения ступеней $LIR = \Delta\sigma/\sigma$ должен быть небольшим, чтобы не разрушать структуру грунта [14] и упростить графические построения. Также можно использовать кинематический режим нагружения с заданной скоростью деформирования (метод CRS) [5].

Краткая характеристика методов определения σ_c и принципы их построений

Метод	Принцип метода
Группа полулогарифмических методов	
Казагранде	Построения проводятся в пространстве коэффициента пористости и логарифма напряжений $e - \log \sigma$ (Рис. 1а). К точке максимальной кривизны компрессионной кривой проводится касательная и горизонтальная линия. Далее, между ними проводится биссектриса. Точка пересечения биссектрисы и касательной к конечному участку определяет напряжение предуплотнения σ_c [12]. Этот метод стандартизован в ГОСТ Р 58326—2018 [2].
Пашеко Силвы	Пространство построений $e - \log \sigma$ (Рис. 1б). Построения состоят в проведении горизонтальной линии через начальный коэффициент пористости e_0 до пересечения с касательной к конечному участку. Далее из точки пересечения опускается вертикальная линия до пересечения с компрессионной кривой, после этого проводится ещё одна горизонтальная линия, пересечение которой с касательной к конечному участку определяет напряжение предуплотнения σ_c [20].
Бэрланда	Построения проводятся в пространстве индекса пористости и логарифма напряжений $I_V - \log \sigma$ (Рис. 1в), которое эквивалентно пространству $e - \log \sigma$. Напряжение предуплотнения σ_c определяется пересечением касательных к начальному и конечному участкам компрессионной кривой [11].
Буна	Пространство построений $e - \log \sigma$ (Рис. 1г). Этот метод использует петлю разгрузки. Напряжение предуплотнения определяется пересечением касательной к конечному участку и линией, параллельной петле разгрузки, проходящей через точку бытового давления [9].
Группа билогарифмических методов	
Баттерфилда, Оикавы, Шридарана, Оницуки	Билогарифмические методы были предложены многими исследователями [10, 18, 19, 22]. Эти методы используют билогарифмическое пространство для зависимости $e+1$ от напряжения σ (Рис. 1д). Отличие методов в выборе основания логарифма. Методы предлагают одни и те же конструкции, которые не зависят от масштаба осей. (Поскольку методы различаются только масштабом осей, их точность одинакова. В данном исследовании эти методы будут рассматриваться как один метод).
Группа энергетических методов	
Тавенаса, Беккера	Используется удельная работа (энергия) деформации как критерий определения напряжения предуплотнения. Построения проводятся в билинейном пространстве зависимости накопленной энергии деформации W от эффективного напряжения σ . Напряжение предуплотнения σ_c определяется простым пересечением касательных к начальному и конечному участку (Рис. 1е) [8, 23]. Этот метод стандартизован в ГОСТ Р 58326—2018 [2].
Нагараджа и Шринивасы	Похож на метод Беккера, отличие в использовании пространства $\log W - \log \sigma$ (Рис. 1ж) [16].
Шенола и Саламера	Похож на метод Беккера, отличие в использовании пространства $W - \log \sigma$ (Рис. 1и) [21].
Вана и Фроста	Похож на метод Беккера, но использует петлю разгрузки при построениях. Для получения линии рассеянной энергии деформации из линии первичного сжатия графически вычитается линия декомпрессии, как показано на Рис. 1к [26].

Регулярность приращения ступеней. Коэффициент приращения ступеней LIR должен быть постоянным во время испытания. Если, например, ступени возрастают на фиксированную величину, то это приводит к учащению точек в области больших напряжений, и, как следствие, к искажению компрессионной кривой в этой области. В результате наблюдается обратный изгиб компрессионной кривой, что не позволяет достоверно определить линию первичного сжатия [14].

Критерием стабилизации для водонасыщенных грунтов является завершение фильтрационной консолидации, которое определяется либо графическими методами Тейлора или Казагранде [2], либо по рассеиванию избыточного порового давления в образце. Если в схеме испытания принят критерий условной стабилизации по времени и (или) деформации, то это может привести к дополнительным деформациям вследствие объемной ползучести, а компрессионная кривая будет искажена [24].

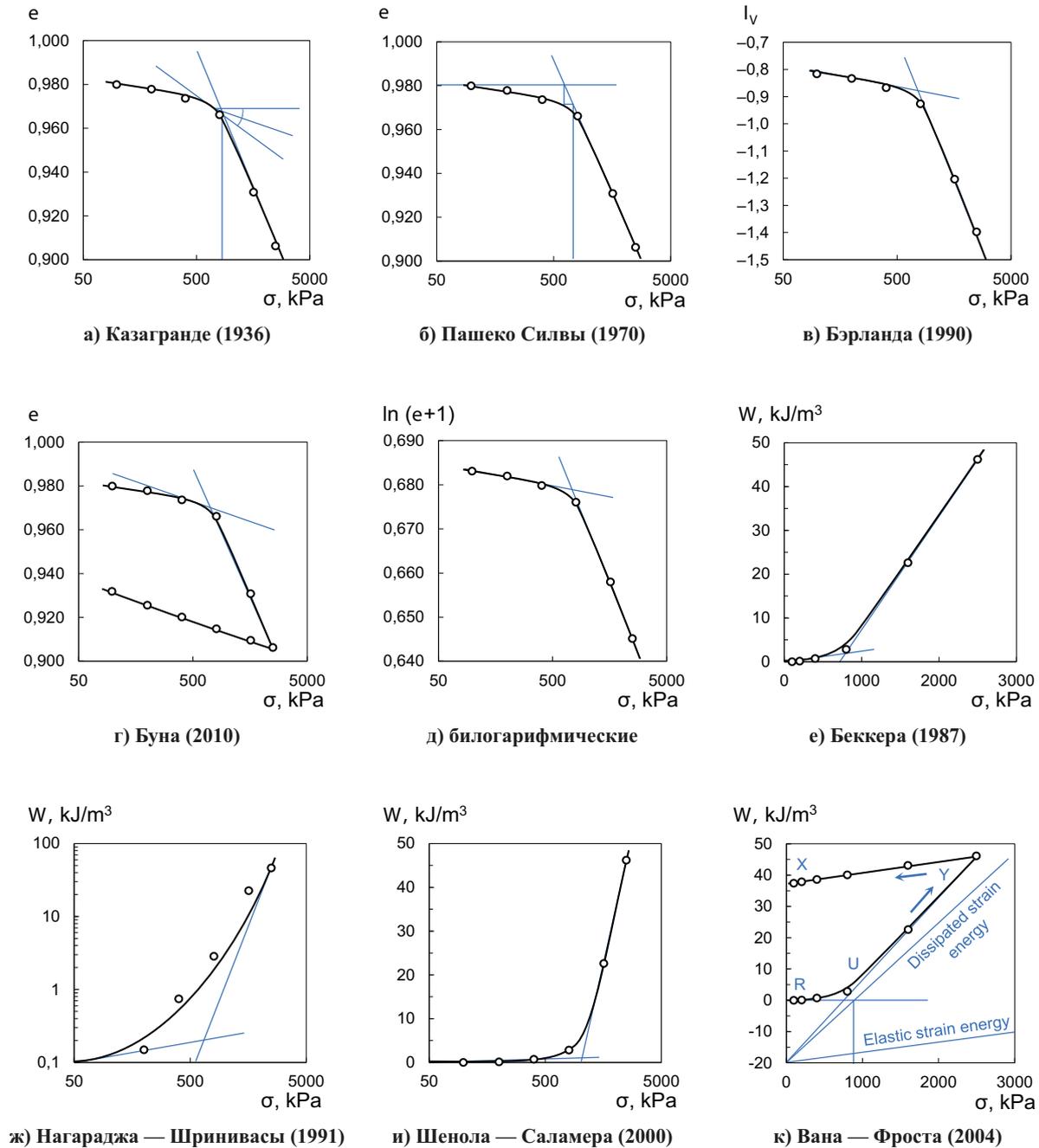


Рис. 1. Графические построения методов определения σ_c .

Максимальное напряжение очевидно должно быть больше предполагаемого напряжения уплотнения σ_c , причем на столько, чтобы гарантировать выход на линию первичного сжатия NCL. Однако стоит принять во внимание, что линейный закон сжимаемости имеет свои ограничения. При больших напряжениях наблюдаются большие относительные деформации и некоторые допущения, принятые для малых деформаций, могут оказывать влияние на результат. В таком случае предпочтительно выбирать методы, использующие естественные деформации, например билогарифмические.

Метод осреднения. Метод Казагранде неустойчив к изменению пропорций масштабов осей, поскольку в построениях используется биссектриса, которая не сохраняет свои свойства при таких трансформациях. Проведение биссектрисы является способом осреднения угла наклона горизонтальной прямой и касательной к точке с наименьшим радиусом кривизны [7]. Использование биссектрисы в пространстве величин различных размерностей сомнительно, в виду того, что необходимо устанавливать коэффициент пропорциональности между ними [13]. В качестве улуч-

Таблица 2.

Влияние объективных факторов на точность графических построений

Этап исследований	Объективные факторы	Воздействующие меры факторов	
		повышение точности	снижение точности
Пробоотбор	Качество образцов	Высокое	Низкое
Испытания	Процедура реконсолидации	Наличие	Отсутствие
	Количество ступеней и их величина	Коэффициент LIR намного меньше единицы ($LIR < 1$), либо кинематический режим (CRS)	Коэффициент приращения ступеней LIR больше единицы
	Регулярность приращения ступеней	Во время испытания коэффициент приращения ступеней LIR не изменяется	Коэффициент LIR непостоянный, например, когда разница между ступенями одинаковая
	Критерий стабилизации	Окончание фильтрационной консолидации	По времени. Проявление эффекта объемной ползучести
	Максимальное напряжение	Намного больше предполагаемого напряжения предуплотнения	Сопоставимо или лишь ненамного больше напряжения предуплотнения
Графические построения	Метод осреднения линий	Медиана	Биссектриса
	Метод сглаживания	Аппроксимация	Интерполяция
	Определение точек	Аналитическое дифференцирование	Графическое дифференцирование
	Определение отрезков	Метод наименьших квадратов	Проведение секущих

шения этого построения нами предлагается использовать медиану, в таком случае точка пересечения не будет зависеть от выбранного масштаба оси.

Метод сглаживания экспериментальных точек. Графические построения, особенно в методах Казагранде и Пашеко Силвы, требуют гладкой непрерывной линии. Интерполяция, как линейная, так и кубическая, не дает существенных преимуществ. Аппроксимация компрессионной кривой на данном участке аналитической функцией является наиболее подходящим решением. В энергетических методах переход от деформации к энергии деформации путем прямого интегрирования, а не методом трапеции, также повышает точность построений [17].

Определение точек максимальной кривизны и точек для целей проведения касательных способом дифференцирования может осуществляться как графически (визуально), так и аналитически (при аппроксимации экспериментальной компрессионной кривой).

Определение отрезков. Самым простым способом является проведение секущей, соединяющей две крайние точки отрезка. Однако при таком подходе не учитываются возможные случайные отклонения крайних точек и совершенно игнорируются точки внутри отрезка. Более приемлемым способом обработки отрезка является метод наименьших квадратов.

Субъективные факторы. Оператор для графических построений субъективно выбирает для проведения касательных отрезки и точки, наиболее представительные на его взгляд. Собственно, проведение касательной и является субъективным фактором. Различные методы используют разный набор касательных для своих графических построений (табл.3).

В таблице 4 показана связь объективных и субъективных факторов.

Только одна касательная используется в методе Пашеко Силвы, соответственно, этот метод наименее подвержен влиянию субъективных факторов [13], однако из этого не следует высокая точность, как это было показано в работах [17] и [24].

Касательная к начальному участку используется во всех рассмотренных методах, кроме оригинального метода Казагранде, метода Пашеко Силвы, и методов, в которых касательная проводится

к ветви разгрузки. Начальный участок компрессионной кривой соответствует рекомпрессии грунта и отражает его упругое поведение.

Часто при определении касательной к начальному участку возникают сложности. На слабо переуплотненных грунтах этот участок короткий и слабо выражен. В случае образцов неудовлетворительной сохранности изгиб между линией рекомпрессии и линией первичного сжатия NCL получается округлым и плавным. Однако изгиб нелегко обнаружить даже в высококачественных образцах, потому что линия декомпрессии является частью петли гистерезиса. При испытании образцов настоятельно рекомендуется проводить процедуру реконсолидации.

В качестве стартовой точки начального участка рекомендуется выбирать точку бытового давления. Включать в начальный участок напряжения, меньше бытового давления не рекомендуется, это приводит к заниженному значению σ_c и завышению индекса рекомпрессии C_r .

Касательную можно получить либо аналитически, дифференцируя функцию, аппроксимирующую компрессионную кривую, в стартовой точке, либо обработав методом наименьших квадратов отрезок компрессионной кривой, соответствующий начальному участку. Для этого необходимо выбрать конечную точку начального интервала. При выборе конечной точки желательно придерживаться наилучшего приближения к экспериментальной кривой, принимая во внимание, что наклон линии рекомпрессии отличается, как правило, в 3-8 раз от наклона линии первичного сжатия NCL [25]. Выбор излишне широкого интервала приводит к завышенному значению σ_c и заниженному индексу рекомпрессии C_r .

Таблица 3.									
Субъективные факторы при графических построениях									
Субъективный фактор (касательная)	Методы								
	Полулогарифмические				Билогарифмические	Энергетические			
	Казагранде	Пашеко Силвы	Бэрланда	Буна		Беккера, Тавенаса	Нагараджа — Шринивасы	Шенюла — Саламера	Вана — Фроста
к начальному участку	• ¹	—	•	—	•	•	•	•	—
к точке макс. кривизны	• ²	—	—	—	—	—	—	—	—
к ветви разгрузки	—	—	—	•	—	—	—	—	•
к конечному участку	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Примечания: ¹ по ГОСТ Р 58326-2018, приложение Г [3] ² в работе Casagrande (1936) [12]									

Касательная к точке максимальной кривизны используется только в оригинальном методе Казагранде. При определении точки максимальной кривизны возникают значительные трудности. В работе [12] Казагранде предлагал выбирать точку с наименьшим радиусом кривизны компрессионной кривой. Следует отметить, в приложении «Г» ГОСТ Р 58326-2018 [3] предлагается модификация этого метода, упрощающая выбор точки наибольшей кривизны, при этом проводится касательная к начальному участку, а выбор точки кривизны уже не зависит от оператора.

Неправильный выбор точки максимальной кривизны, а также некорректное проведение касательной может приводить как к завышению, так и к занижению напряжения предуплотнения σ_c .

При аппроксимации компрессионной кривой аналитической функцией поиск точки максимальной кривизны становится тривиальной задачей.

Касательная к ветви разгрузки используется при графических построениях в методах Вана-Фроста и Буна вместо касательной к начальному участку. Ветвь разгрузки соответствует декомпрессии грунта и отражает упругое его поведение. Качество образцов практически не сказывается на характере разгрузки, что является несомненным преимуществом ее использования [9]. Также использование касательной к ветви разгрузки рекомендуется для слабо переуплотненных грунтов.

Линии декомпрессии и рекомпрессии образуют петлю гистерезиса и имеют нелинейный характер, причем линия декомпрессии вогнутая, а линия рекомпрессии выпуклая. Касательная к ветви разгрузки не должна проводиться только к начальной части ветви, поскольку в этом месте ветвь разгрузки практически горизонтальна, что ведет к переоценке индекса декомпрессии C_s и недооценке σ_c . Также следует избегать проведения касательной к конечному участку ветви разгрузки, это может привести к обратной ситуации, C_s будет недооценен, а σ_c переоценен.

Таблица 4.					
Связь объективных и субъективных факторов					
Этап исследования	Объективный фактор	Субъективный фактор			
		НУ	ТК	ВР	КУ
Пробоотбор	Качество образцов	•	•	—	•
Проведение испытаний	Процедура реконсолидации	•	•	—	—
	Количество ступеней и их величина	•	•	•	•
	Регулярность приращения ступеней	—	—	—	•
	Критерий стабилизации	•	•	—	•
	Максимальное напряжение	—	—	—	•
Графические построения	Метод осреднения линий	—	—	—	—
	Метод сглаживания кривой	•	•	•	—
	Определение точек	—	•	—	—
	Определение отрезков	•	—	•	•
Примечание: НУ – касательная к начальному участку, ТК – к точке максимальной кривизны, ВР – к ветви разгрузки, КУ – к конечному участку.					

Для обработки касательной к ветви разгрузки следует использовать метод наименьших квадратов, примененный к наиболее представительному участку ветви разгрузки. Выбирать весь интервал разгрузки не рекомендуется, это может привести к завышению значения напряжения предуплотнения σ_c и занижению индекса декомпрессии C_s . В качестве первого приближения, можно воспользоваться эмпирической закономерностью, полагающей, что линии декомпрессии и рекомпрессии в 3-8 раз более пологие, чем линия первичного сжатия NCL [25]. По-видимому, оптимальной длиной такого участка является величина логарифма предполагаемого коэффициента переуплотнения OCR . Для графического построения мы рекомендуем провести через точку бытового давления линию, параллельную к касательной к конечному участку, при этом отсекаемый участок ветви разгрузки и будет искомым. Далее обработка выполняется методом наименьших квадратов.

Основными факторами, оказывающими влияние на проведение касательной к ветви разгрузки, являются: величина ступеней, метод сглаживания, а также выбор представительного участка (табл.4).

Касательная к конечному участку используется во всех графических методах. Конечный участок компрессионной кривой отвечает первичному сжатию. При первичном сжатии в грунте преобладают пластичные деформации.

Чтобы правильно провести касательную к конечному участку, необходимо надежно перейти на линию первичного сжатия NCL. Для достоверного выхода на линию первичного сжатия NCL максимальная нагрузка должна быть в несколько раз выше ожидаемого напряжения предварительного уплотнения, что для сильно переуплотненных грунтов может оказаться недостижимым в силу технических ограничений испытательной установки. В случае неполного выхода на линию первичного сжатия NCL напряжение предуплотнения окажется недооцененным, а индекс компрессии C_c завышен.

Следует отметить, что иногда при высоких напряжениях наблюдается обратный изгиб графика. Это может указывать на то, что линейный закон деформируемости выходит за пределы применимости. Кроме того, аналогичный эффект может наблюдаться, когда коэффициент приращения ступеней LIR не является константой в схеме испытания и уменьшается с увеличением эффективного напряжения. В таких случаях касательную к конечному участку следует проводить в самой крутой его части, в противном случае это приведет к недооценке напряжения предуплотнения и переоценке индекса компрессии C_c .

Касательную к конечному участку следует определять методом наименьших квадратов на наиболее представительном участке.

Среди объективных факторов, оказывающих влияние на проведение касательной к конечному участку, также выделяются низкое качество образцов, разрушение образца в процессе испытания из-за слишком большого коэффициента приращения ступеней LIR , а также неверный выбор критерия стабилизации (табл.4).

Заключение

Выявлены некоторые недостатки графических методов определения напряжения предуплотнения σ_c , а также выявлены и систематизированы объективные и субъективные факторы, оказывающие влияние на точность этих графических построений.

Представленная систематизация объективных и субъективных факторов, поможет оценить влияние этих факторов и их вклад в общую погрешность определения напряжения предуплотнения, а также упростит выбор наиболее подходящих методов определения напряжения предуплотнения.

Литература

1. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов
2. ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
3. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.
4. Крамаренко В., Никитенков А. О структурной прочности глинистых грунтов территории Томской области // Известия ТГУ. 2014. С. 1–16.
5. Мельников Р.В., Попков А.А. Применение метода Беккера для определения давления предварительного уплотнения при кинематическом режиме компрессионного испытания // Геотехника. 2016. № 6. С. 54–59.
6. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга / А.Н. Труфанов, О.А. Шулятьев, А.В. Ростовцев, Г.У. Габсалимов // Инженерные изыскания. 2014. № 11. С. 32–39.
7. Оценка точности различных методов определения напряжения предуплотнения (на примере глинистых грунтов г. Москвы) / В. В. Матвеев, Е. А. Фадеев, М. О. Шевцов, В. В. Шанина // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов - проблемы и решения: Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки, Москва, 21 мая 2021 года. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 124-132.
8. Becker D.E., Crooks J.H.A., Been K., Jefferies M.G. (1987) Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 24. No. 4. P. 549–564.
9. Boone S.J. (2010) A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 47. No. 3. P. 281–296. <https://doi.org/10.1139/T09-093>.
10. Butterfield R. (1979) A natural compression law for soils (an advance on $e - \log p'$). *Géotechnique*, 24(4): 469-480.
11. Burland J.B. (1990) On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329-378.
12. Casagrande A. (1936) The determination of the preconsolidation load and its practical significance. *Proceedings of the 1st International Conference on soil mechanics and foundation engineering*. Cambridge, UK: Harvard Printing Office, Vol. 3. P. 60–64.
13. Clementino R.V. (2005) Discussion of “An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays.” *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), 972–974. doi:10.1139/t05-010

14. Crawford C.B. (1964) *Interpretation of the consolidation test. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 90(5): 87–102.
15. Grozic J.L., Lunne T., & Pande S. (2003) *An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays. Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 857–872. doi:10.1139/t03-043
16. Nagaraj T.S., Shrinivasa Murthy B.R., Vatsala A. (1991) *Prediction of soil behaviors – part II – saturated uncemented soil. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 21. No. 1. P. 137-163.*
17. Matveev V.V., Shanina V.V. *The influence of subjective factors on the accuracy of graphical constructions to interpret the preconsolidation pressure in IL-tests Proceedings of 3rd European Regional Conference of IAEG / Athens / Greece / 6-10 October 2021. — Vol. 2. — National Group of Greece of IAEG Athens, Greece, 2021. — Pp. 10–17.*
18. Onitsuka K., Hong Z., Hara Y., & Yoshitake S. (1995) *Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays. Soils and foundations*, 35(3), 61–70. doi:10.3208/sandf.35.61
19. Oikawa H. (1987) *Compression curve of soft soils. Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations. Vol. 27. No. 3. P. 99–104.*
20. Pacheco Silva F. (1970) *A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. Proceedings of the 4th Brazilian Conference on soil mechanics and foundation engineering. Rio de Janeiro, Brazil. Vol. 2. No. 1. P. 225–232.*
21. Senol A., Saglamer A. (2000) *Determination of Preconsolidation Pressure with a New Strain Energy-Log Stress Method. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 5.*
22. Sridharan A., Abraham B. M., and Jose B.T. (1991) *Improved technique for estimation of preconsolidation pressure. Géotechnique. Vol. 41. No. 2. P. 263–268.*
23. Tavenas F., Des Rosier J.P., Leroueil S. et al. (1979) *The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays. Géotechnique. Vol. 29. P. 285–303.*
24. Umar M., Sadrekarimi A. (2016) *Accuracy of determining pre-consolidation pressure from laboratory tests. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 54. No. 3. P. 441–450. https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0203.*
25. Verbrugge, J.C. and Ch. Schroeder. «*Geotechnical Correlations for Soils and Rocks.*» (2018).
26. Wang L., Frost J.D. (2004) *Dissipated strain energy method for determining preconsolidation pressure. Canadian Geotechnical Journal. 2004. Vol. 41. No. 4. P. 760–768. https://doi.org/10.1139/t04-013.*