

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ОСНОВАНИЙ В СЛОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

**Клебанюк Д.Н., Пойта П.С., Шведовский П.В.**

Интенсивное развитие промышленного и гражданского строительства в современных условиях приводит к необходимости освоения весьма сложных в инженерно-геологическом отношении территорий. Однако использование таких территорий возможно только после проведения объемных мероприятий по их инженерной подготовке, требующих дополнительных затрат на подготовку оснований.

Практикой отечественного и зарубежного опыта [1-5], доказано, что наиболее рациональным способом подготовки строительных площадок со слабыми основаниями является уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками.

Однако эффективное применение интенсивного ударного уплотнения грунтов возможно только при достоверных знаниях исходного состояния уплотняемых грунтов, влиянии технологических параметров, динамики изменения свойств грунтов в процессе уплотнения и после, с учетом упрочнения во времени. Имеющиеся исследования [2, 4, 5, 6] позволяют установить характера уплотнения по глубине, но не позволяют прогнозировать конкретного улучшения свойств грунта и осуществить прогноз параметров, которые будут получены при уплотнении грунта интенсивными ударными нагрузками. При этом выбор технологических параметров уплотнения (массы трамбовки, высоты сбрасывания, расстояния между соседними точками удара трамбовки) вообще осуществляется на основе результатов пробного уплотнения грунтов на строительной площадке. Отсутствие методик комплексного учета этих факторов зачастую приводит к неэкономичным решениям фундаментных конструкций.

Отсюда детальное выявление основных закономерностей, описывающих механизм уплотнения грунтов, его связь с конструктивно – технологическими параметрами и параметрами искусственных оснований, позволяющих не только качественно запроектировать фундаменты зданий и сооружений, но и обеспечить энергоэффективность их устройства и высокую их эксплуатационную надежность на сегодня важно и актуально.

Анализ результатов имеющихся и проведенных нами экспериментальных исследований [5, 7, 8] показывает, что с увеличением модуля деформации грунтов в естественном состоянии ( $E_0$ ) требуется уменьшение диаметра трамбовки ( $d_{mp}$ ) и при прочих постоянных условиях (естественная и требуемая плотности сухого грунта ( $r_d^{ecm}$  и  $r_d^{mp}$ ), мощность уплотняемой толщи ( $h_{yn}$ ), энергия удара ( $M_j$ )) может быть описана следующей зависимостью:

$$d_{mp}^1 = 41.68 \cdot \lg(E_0 - 1.37) + 0.79 \quad (1)$$

с индексом корреляции  $-R = 0.998$ .

При этом уменьшение  $d_{mp}$  возможно до определенных пределов, так как при малых значениях  $d_{mp}$  ( $d_{mp} < 1,0$  м) происходит разуплотнение грунта с образованием зон выпора за пределами пяты трамбования.

Выявлено также, что чем больше мощность уплотняемого слоя ( $H_{yn}$ ), тем  $d_{mp}$  (при прочих постоянных условиях) должен быть меньше и зависимость между ними может быть описана в следующем виде:

$$d_{mp} = 10.01 \cdot H_{yn}^{-0.54} - 0.6 \quad (2)$$

с индексом корреляции –  $R = 0.994$ .

А это определяет необходимость при уплотнении грунтовых толщ большой мощности одновременно с увеличением  $d_{mp}$  увеличивать массу трамбовки ( $M$ ) и высоту сброса ( $H$ ).

При этом, чем больше требуемая плотность сухого грунта ( $r_d^{mp}$ ), тем  $d_{mp}$  (при прочих постоянных условиях), должен быть меньше и зависимость между ними имеют следующий вид:

$$d_{mp} = 0.49 \cdot (r_d^{mp})^{-0.92} + 1.51 \quad (3)$$

с индексом корреляции –  $R = 0.999$ .

Следует также отметить, что наибольшая эффективность уплотнения грунтовых оснований достигается при оптимальной влажности ( $w_{opt}$ ) грунтов. При влажности ниже оптимальной требуется большая энергия на разрушение существующей и формирование новой структуры, что и обуславливает уменьшение глубины уплотнения ( $H_{yn}$ ) при некотором повышении степени уплотнения. При этом с увеличением содержания глинистых частиц значение  $r_d^{max}$  возрастает.

Отсюда следует что, чем однороднее уплотняемый грунт, тем плотность будет выше при одних и тех же энергозатратах на уплотнение.

Выявлено также, что чем больше энергия удара ( $\sqrt{MgH}$ ), тем  $w$  меньше. При этом практически для всех видов и состояний грунтов наибольшее снижение  $w$  характерно на первоначальном этапе уплотнения, даже при малой энергии удара. Увеличение энергии удара обуславливает уменьшение  $w$ , но оно очень незначительное. Что касается изменений  $r_d$ , то оно имеет обратную тенденцию, т. е. при увеличении энергии удара  $r_d$  увеличивается и, особенно, на начальном этапе уплотнения.

Выявлено так же, что увеличение массы трамбовки зачастую не обеспечивает не только требуемую степень уплотнения, с минимальными энергетическими затратами, но и равномерность распределения плотности по глубине, т.е. однородность основания.

Практика также показывает, чем меньше статическое давление на грунт, тем больше ударов в одной точке необходимо выполнять для достижения грунтом требуемой плотности. Малые размеры подошвы трамбовки не только затрудняют производство работ, но, и при достижении определённого предела по диаметру, делают эти работы практически невозможными из-за выпора грунта.

Оптимальная площадь основания трамбовки будет лишь в том случае, когда работа ( $N_{фак}$ ), затрачиваемая на уплотнение грунта будет минимальной ( $N_{min}$ ), т.е.

$$N_{фак} = M \cdot H \cdot \frac{B}{A} \cdot n \in N_{min}, \quad (4)$$

где  $M$  – масса трамбовки, принимаемая с учётом грузоподъёмности механизма, тс;

$H$  – высота сбрасывания трамбовки, м;

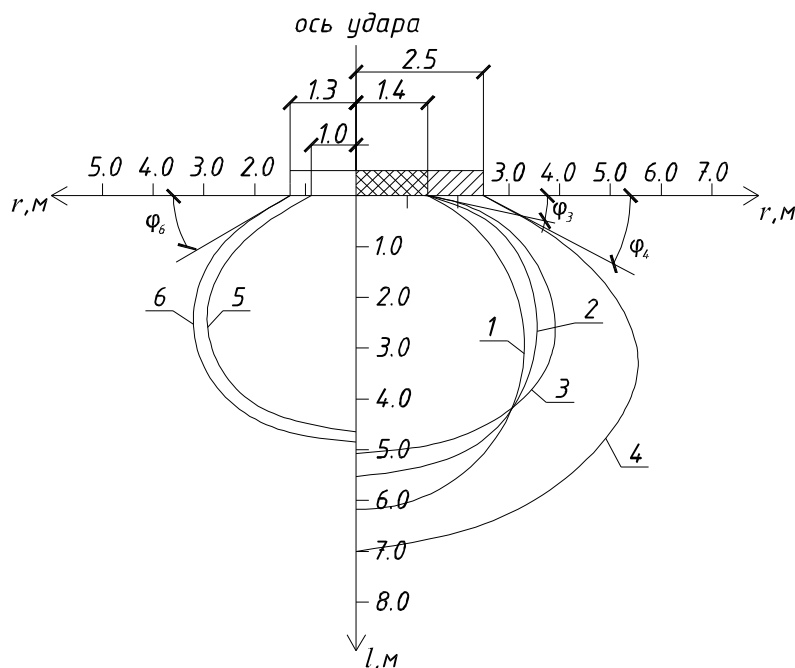
$B$  – площадь участка в пределах которого требуется уплотнение грунтов, м<sup>2</sup>;

$A$  – площадь основания трамбовки, м<sup>2</sup>;

$n$  – число ударов трамбовки в одной точке.

При этом трамбовка одной и той же массы с различными размерами и формами подошвы обуславливает совершенно разное статическое давление на грунт, формируя тем самым соответствующее напряженно-деформированное состояние грунтового массива.

Не менее существенным фактором качественного уплотнения является и расстояние между точками уплотнения и схема их расположения[4]. Характер и контуры зон уплотнения для различных грунтов и диаметров трамбовок приведены на рисунке 1.



1,2,3 – при уплотнении трамбовками  $\text{Æ}2,8$  м естественных оснований сформированных однородными связными грунтами; 4 –  $\text{Æ}$  трамбовки 5 м, при наличии прочного подстилающего слоя песчаных грунтов; 5 и 6 – соответственно для трамбовок  $\text{Æ}2$  и 2,6 м на намывных территориях из песчаных грунтов

**Рисунок 1 – Контуры зон уплотнения грунтового основания**

Анализ контуров уплотнения показывает, что расстояние между точками трамбования зависит от угла наклона секущей прямой ( $j$ ) к горизонту. Мощность зоны уплотнения в этих условиях изменяется в пределах  $l = 4,5-7,5$  м, ширина периферийной зоны, за пределы центральной зоны (столба), – в пределах  $r = 2,6-4,0$  м, а угол наклона секущей прямой к горизонту варьирует в пределах  $j_i = 22^\circ - 50^\circ$ , при этом, при больших значениях угла  $j$ , обеспечивается более качественное уплотнение грунта как по глубине, так и по площади. Кроме того увеличение угла  $j$  позволяет увеличить расстояние между точками трамбования ( $b$ ), минимизирующие трудозатраты работ по уплотнению.

Вместе с тем [7] отмечено, что влияние угла  $j$  на величину ( $e$ ) не всегда столь существенно, как влияние других факторов, что связано с особенностями формирования центральной зоны (столба) уплотнённого грунта, развития периферийной зоны уплотнения и взаимодействия периферийных зон.

Проведенные исследования [2, 8, 12] формирования зон уплотнения показывают, что в зоне уплотнения наблюдается в основном радиальное направление нормалей к площадкам главных деформаций сжатия, т.е. радиальные деформации

преобладают над вертикальными и поэтому интенсивные удары плоских трамбовок обуславливают на начальном этапе уплотнения сжатие центральной зоны (столба) грунта в области подошвы, с последовательным радиальным его боковым расширением, вызывающим радиальное сжатие грунта в периферийной зоне.

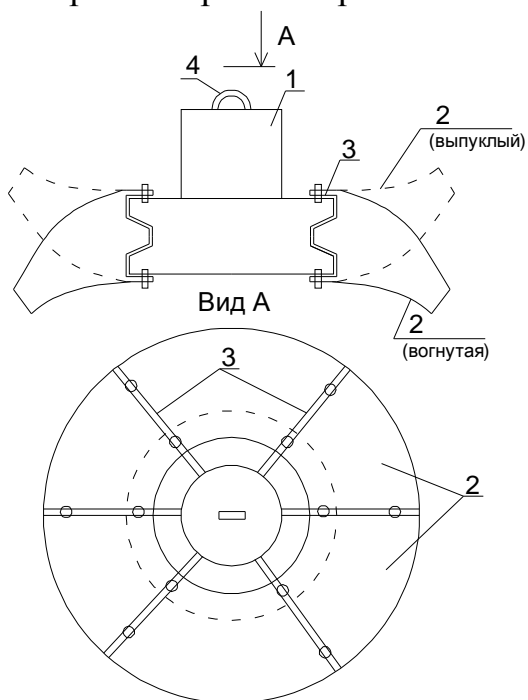
При этом если плотность грунта периферийной зоны относительно высокая, то радиальное сжатие может сопровождаться выпором грунта. При низкой естественной плотности грунта влияние радиального распора на деформации периферийной зоны будет существенно менее значимо.

Всё это и определяет основные факторы механизма деформации периферийной зоны: естественная плотность грунта; степень радиального расширения и уплотнения грунта в центральной зоне; величины сил трения на контакте центральной и периферийной зон [9].

Отсюда следует, что наиболее эффективным в области оптимизации процесса уплотнения будет являться поиск площадей, форм поверхностей подошвы трамбовок и схемы расположения точек трамбования.

Исходя из анализа особенностей динамики формирования напряженно-деформированного состояния грунтов для центральной и периферической зон массива уплотнения были рассмотрены варианты с выпуклыми и вогнутыми сферическими поверхностями подошв тяжелых трамбовок (рисунок 2).

Что касается выбора точек трамбования, то на практике, как правило, используется квадратная схема размещения точек, т.е. уплотнение производится по условной сетке различных размеров в один, либо в два этапа. При уплотнении грунтов в один этап точки, в которых осуществляется уплотнение, расположены по вершинам квадрата. При двухэтапной схеме вначале производится уплотнение в точках, расположенных по вершинам больших квадратов. Затем делается технологический перерыв, составляющий не менее 10 суток. И по окончании перерыва производится дальнейшее уплотнение грунта в точках, расположенных в середине расстояния между существующими кратерами [2, 6]. Однако, как показали наши исследования [11], более оптимальным решением является размещение точек уплотнения грунта, по вершинам равностороннего или равнобедренного треугольника.



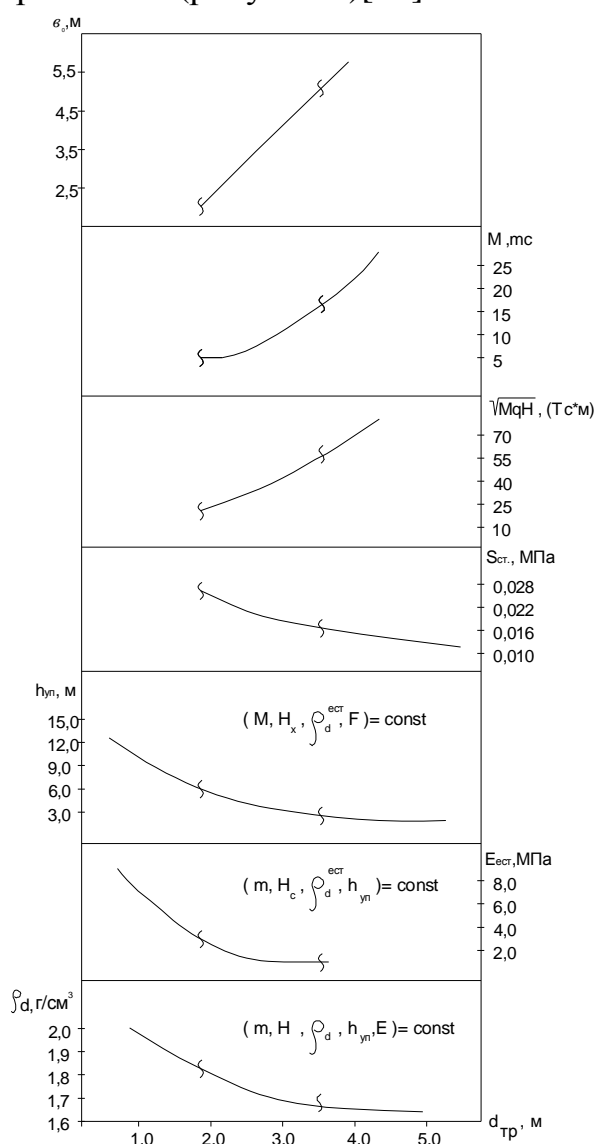
*1 – цилиндрическая емкость заполненная тяжелым бетоном; 2 – криволинейные съемные фланцы уширения; 3 – жесткие элементы крепления; 4 – подъемный крюк*

**Рисунок 2 – Конструктивная схема тяжёлых трамбовок с криволинейной подошвой**

Вместе с тем, как показала практика, даже при оптимальном выборе формы и площади подошвы трамбовки и схемы расположения точек трамбования не всегда удастся обеспечить однородность грунтового массива по плотности.

Оптимальным же вариантом уплотнения грунтов тяжёлыми трамбовками, с технологической точки зрения, для обеспечения максимальной глубины зоны уплотнения с достаточно однородной степенью уплотнения является двухэтапное уплотнение: в начальный период - трамбовками больших диаметров (например, 2.0 м) с выпуклой сферической поверхностью подошвы, а при достижении отказа произвести доуплотнение трамбовками меньшего диаметра (например, 1.2 м) с вогнутой сферической поверхностью подошвы, т.е. обеспечивая поцикличное увеличение контактного давления на уплотняемое грунтовое основание.

Проведенный анализ имеющихся результатов научных исследований и проведенных нами производственно-экспериментальных работ позволили выявить достаточно полную взаимосвязь и определить предпочтительный диапазон требуемых свойств грунтовых оснований и конструктивно-технологических параметров тяжёлых трамбовок (рисунок 3)[12].



$M$  - масса трамбовки;  $h_{уп}$  - мощность уплотняемой зоны;  $v_o$  - расстояния между точками трамбования,  $MgH$  – энергия одиночного удара;  $E_{ест}$  - модуль деформации,  $S_{ст}$  - статическое давление на грунт

**Рисунок 3 – График взаимосвязи диаметров трамбовок со свойствами уплотняемых грунтов  $d_{mp} = f(P_d^{mp}, E_{ест})$  и технологическими параметрами  $d_{mp} = j(h_{уп}, S_{ст}, M, H, \sqrt{MgH}, \epsilon_0)$**

Выявленные взаимозависимости между диаметром ( $d_{mp}$ ) и массой ( $M$ ), исходной влажностью ( $w$ ), глубиной отпечатка ( $h_{omn}$ ), энергией удара ( $\sqrt{MgH}$ ), работой ( $A$ ) и числом ударов ( $n$ ), расстоянием между точками уплотнения ( $l$ ), соотношением плотностей сухого грунта ( $\frac{\rho_d^{фак}}{\rho_d^{mp}}$ ), модулем деформации ( $E_0$ ) позволили определить оптимальный диапазон конструктивно-технологических параметров (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендуемый диапазон конструктивно-технологических параметров уплотнения грунтовых оснований

№№ п/п	Толщина уплотняемого слоя, $H_{yn}$ , м		Массы трамбовки $M$ , т	Диаметр трамбовки, $d_{mp}$ , м	Высота сброса, $H$ , м	Число ударов по одному следу, $n$	Глубина отпечатка, $h_{omn}$ , м
	глинистые грунты	песчаные грунты					
1	2	3	4	5	6	7	8
1	до 2,0	до 2,2	до 2,5	до 1,2	6 – 8	12 – 14	0,6 – 0,8
2	2,0 – 2,5	2,2 – 2,5	2,5 – 3,5	1,2 – 1,6	6 – 8	12 – 14	0,6 – 0,8
3	2,5 – 3,0	2,5 – 3,5	3,5 – 5,5	1,6 – 1,8	6 – 8	12 – 14	0,7 – 0,8
4	3,0 – 4,5	3,5 – 4,8	5,5 – 6,5	1,8 – 2,0	6 – 8	12 – 14	0,8 – 0,9
5	4,5 – 6,0	4,8 – 6,9	6,5 – 10	2,0 – 2,4	8 – 10	10 – 12	0,8 – 0,9
6	> 6,0	> 7,0	10,0 – 15,0	2,4 – 3,5	8 – 10	8 – 10	0,9 – 1,0

Отсюда следует, что выбор оптимального варианта конструктивно-технологических параметров процесса уплотнения грунтовых оснований в сложных инженерно-геологических условиях не возможен без активного использования САПР.

## ВЫВОДЫ.

1. Произвольный выбор конструктивных параметров тяжелых трамбовок и не учет технологических особенностей и закономерностей динамики уплотнения грунтов практически всегда приводит к удорожанию инженерной подготовки строительных площадок и не позволяет достичь требуемого уплотнения грунтовых оснований при относительно приемлемых энергетических затратах.

2. Оптимизация размеров и форм подошвы трамбовок, а соответственно массы, высоты сбрасывания, расстояния между точками уплотнения, технология и организация производства работ требует полного и достоверного учета как инженерно-геологических условий, так и конструктивно – технологических параметров и сопутствующих им факторов.

3. На формирование зоны уплотнения грунта весьма существенное влияние оказывает форма поверхности подошвы трамбовки. Применение трамбовки с криволинейной поверхностью подошвы позволяет получить значительно большую глубину зоны уплотнения, в сравнении с трамбовкой такой же массы, но с плоской подошвой. Глубина уплотнения для трамбовки с плоской подошвой составила

2,5  $d_{mp}$ , для трамбовки со сферической поверхностью подошвы - 3,1  $d_{mp}$ . Соответственно максимальное уширение зоны уплотнения – 3,4  $d_{mp}$  на глубине 1,25  $d_{mp}$  и 2,1  $d_{mp}$  на глубине 1,5  $d_{mp}$ . При этом расстояние между точками уплотнения можно увеличить на 15-22%, а в некоторых случаях и до 30 %.

4. Наибольшей глубины зоны уплотнения при минимизации энергетических затрат можно достичь за счет применения на начальном этапе уплотнения трамбовок больших диаметров (например, 2,0 м) и при достижении отказа произвести доуплотнение трамбовками с меньшим диаметром (например, 1,2 м), т. е. обеспечивая поцикличное увеличение контактного давления на уплотняемое грунтовое основание.

5. Оптимальное проектное решение подготовки оснований в сложных грунтовых условиях требует применения систем автоматизированного проектирования.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зарецкий, Ю.К. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками / Ю.К. Зарецкий, М.Ю. Гарицелов // М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Швец, В. Б. Уплотнение грунтов оснований тяжелыми трамбовками / В. Б. Швец // Росстройиздат, 1958 – 162 с.
3. Вуцель, В. И. Интенсивное динамическое уплотнение грунтов / В.И. Вуцель, Ю.К. Зарецкий, М.Ю. Гарицелов // Энергетическое строительство за рубежом, 1983. – № 3, с. 39-43.
4. Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура, 2003, № 1, с. 109-110.
5. Пойта, П.С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П.С. Пойта // В жур. «Строительство», Минск, 2003, № 1-2, с. 243-247.
6. Пойта, П.С. Определение оптимального расстояния между точками уплотнения грунта тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта, А.Н. Тарасевич // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура – 2003. – № 1(19). – С. 111-113.
7. Клебанюк, Д.Н. Особенности процесса распределения давлений и напряжений при уплотнении неоднородных грунтовых оснований тяжелыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, А.Ю. Дроневиц, П.В. Шведовский, П.С. Пойта // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII междунар. науч. – метод. семинара. – Новополоцк, 2012. – Т. II. – С. 239–244.
8. Пойта, П.С. Особенности формирования зоны уплотнения грунтов при уплотнении грунтового основания тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта, П.В. Шведовский, Д.Н. Клебанюк // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII междунар. науч. – метод. семинара. – Новополоцк, 2012. – Т. II. – С. С. 189–196.
9. Пойта, П.С. Влияние конструктивных параметров и особенностей формы подошвы тяжелых трамбовок на формирование свойств грунтов в зоне уплотнения / П.С. Пойта, П.В. Шведовский, Д.Н. Клебанюк // Вес. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 72–77.
10. Клебанюк, Д.Н. Особенности методики выбора технологических параметров при уплотнении грунтовых оснований тяжёлыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, П.С. Пойта, П.В. // Вес. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 77–81.
11. Пойта, П.С. Особенности выбора оптимальной схемы размещения точек уплотнения грунтовых оснований тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта, Д.Н. Клебанюк, П.В. Шведовский // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч. – технич. конференции. – Минск, 2013. – Ч. II. – С. 241–249.
12. Клебанюк, Д.Н. Пути совершенствования конструктивно – технологических параметров процесса уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, П.С. Пойта, П.В. Шведовский // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч. – технич. конференции. – Минск, 2013. – Ч. II. – С. 109–120.