

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ВЕРХНЕГО ПРИОБЬЯ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БАРНАУЛА)

Е.И. Вяткина, И.В. Карелина, В.А. Хоменко, А.И. Тищенко

*Приводятся количественные изменения микроструктуры просадочного грунта. Прослеживается динамика изменения ее основных структурных элементов под влиянием тяжелой трамбовки.*

*Ключевые слова: грунт, тяжелая трамбовка, микроструктура, частица, количественный анализ.*

С сентября 1991 г. на кафедре «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» АлтГТУ проводились экспериментальные микроструктурные исследования по уплотнению лессового просадочного грунта трамбовками массой 3,2 и 7 тонн.

Образцы грунта отбирались с экспериментальной площадки, расположенной в юго-западной части г. Барнаула в квартале 2001. Размер опытной площадки составил 9×9 метров. В геоморфологическом отношении район расположен на Приобском плато с превышением дневной поверхности над урезом левобережья р. Оби от 50 до 60 метров. Грунтовые воды в районе экспериментальной площадки в пределе выработок глубиной до 20 метров не обнаружены.

Основанием зданий и сооружений в пределах этой территории являются суглинки и супеси. Суглинки относятся к группам I типа по просадочности. При замачивании под давлением, равным природному, просадка их практически близка к нулю; при замачивании под нагрузкой 0,3 МПа суглинки проявляют просадочные свойства.

Подготовка поверхности образцов для микроструктурных исследований выполнялась способом изготовления аншлифов. Для этого скол зачищался на наждачной бумаге с постепенным уменьшением диаметра абразива. Нарушенный слой частиц на поверхности затем снимался клейкой лентой. Далее подготовка образцов грунта сечением 1×1 см и высотой 0,5 см выполнялась в вакуумном универсальном посту ВУП-5 (рисунок 1) методом мгновенного замораживания при температуре жидкого азота (-150 ÷ -160°C) с последующей их сушкой путем вакуумного сублимирования при температуре не выше -60°C в условиях глубокого вакуума ( $10^{-2} \div 10^{-3}$  Па).

В качестве электропроводного покрытия образцов грунта выбиралось серебро - как материал, имеющий высокий коэффициент вторичной электронной эмиссии и являющийся наилучшим среди других материалов для точного воспроизведения профиля поверхности. Оно наносилось на образцы слоем толщиной 5-50 нм вакуумным термическим осаждением.



Рисунок 1 - Вакуумный универсальный пост (ВУП-5): 1 – рабочий объем для препарирования объектов; 2 – пульт управления и индикации режимов; 3 – блоки питания устройств и приставок; 4 – вакуумная система; 5 – предметный столик с сублимируемыми образцами; 6 – охладитель с жидким азотом

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ВЕРХНЕГО ПРИОБЬЯ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БАРНАУЛА)

Для улучшения электрической проводимости контакта исследуемой поверхности со смотровым столиком боковые поверхности образца промазывались электропроводным клеем.

При невозможности получения первоначальной цифровой информации с растрового электронного микроскопа сразу на магнитный носитель, вначале выполнялись снимки поверхности образцов грунта с последующим сканированием и оцифровкой. При работе использовались растровый электронный микроскоп TESLA BS300 (рисунок 2) и сканирующее устройство UMAX Astra 2100C.



Рисунок 2 - Растровый электронный микроскоп TESLA BS300

В связи с тем, что при одном фиксированном увеличении РЭМ-изображения невозможно охватить весь диапазон структурных элементов глинистой породы как полидисперсной системы, РЭМ-фотографии выполнялись с увеличением от 50 до 3000 раз, т.е. перекрывающие весь диапазон встречаемых размеров элементов грунта. Для исследования микроструктуры лессового грунта опытной площадки в природном состоянии отбирались образцы до глубины 6 м через каждый метр (рисунок 3).

**На первом этапе эксперимента, после уплотнения площадки трамбовкой массой 3,2 т,** отбирались образцы грунта до глубины 7 м для определения физико-механических характеристик уплотненного основания и микроструктурных исследований.

По внешнему осмотру микрофотографий (рисунок 4, а, б) структура уплотненного грунта претерпела изменения, по сравнению с природной, только в образцах с поверхности и с глубины 0,5 м. На снимках с этих горизонтов четко различима зернисто-пленчатая структура скелетно-матричного типа. Умень-

шилась общая пористость, исчезли крупные межагрегатные поры, преобладают изометричные поры размером 5-10 мкм. Отмечается уменьшение размеров твердых структурных элементов до 10-25 мкм за счет их механического разрушения. Произошло перераспределение глинистого материала: глинистые «рубашки» глобул частично разрушены и отмечается наличие почти сплошной глинистой массы (матрицы), в которой содержатся беспорядочно расположенные пылеватые и песчаные зерна. Все это говорит о получении более однородной и плотной микроструктуры скелетно-матричного типа по сравнению с природной.

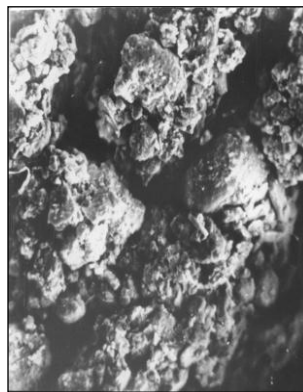


Рисунок 3 - Микроструктура лессового грунта в естественном состоянии,  $\times 350$

Изменение показателя плотности сухого грунта и коэффициента пористости подтверждают эффективность уплотнения только до глубины 0,5 м. Если грунт естественного сложения с поверхности имел значения  $\rho_d = 1,41 \text{ г/см}^3$  и  $e = 0,922$ , то после трамбования  $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$  и  $e = 0,624$ . На снимках образцов уплотненного грунта с глубины от 1 до 3 м (рисунок 4, в-е) видно, что в строении грунта нет существенных изменений по сравнению с РЭМ-изображением образца природного сложения (рисунок 3). Тип структуры – скелетный, класс - зернисто-пленчатый. Твердые структурные элементы представлены округлыми глинисто-пылеватыми агрегатами и песчано-пылеватыми зёрнами диаметром от 10 до 50 мкм. Контакты между частицами точечные через глинистые связки. Глинистый материал расположен на поверхности глобул и в местах контактов зёрен и микроагрегатов. Отсутствуют признаки разрушения природной структуры грунта.

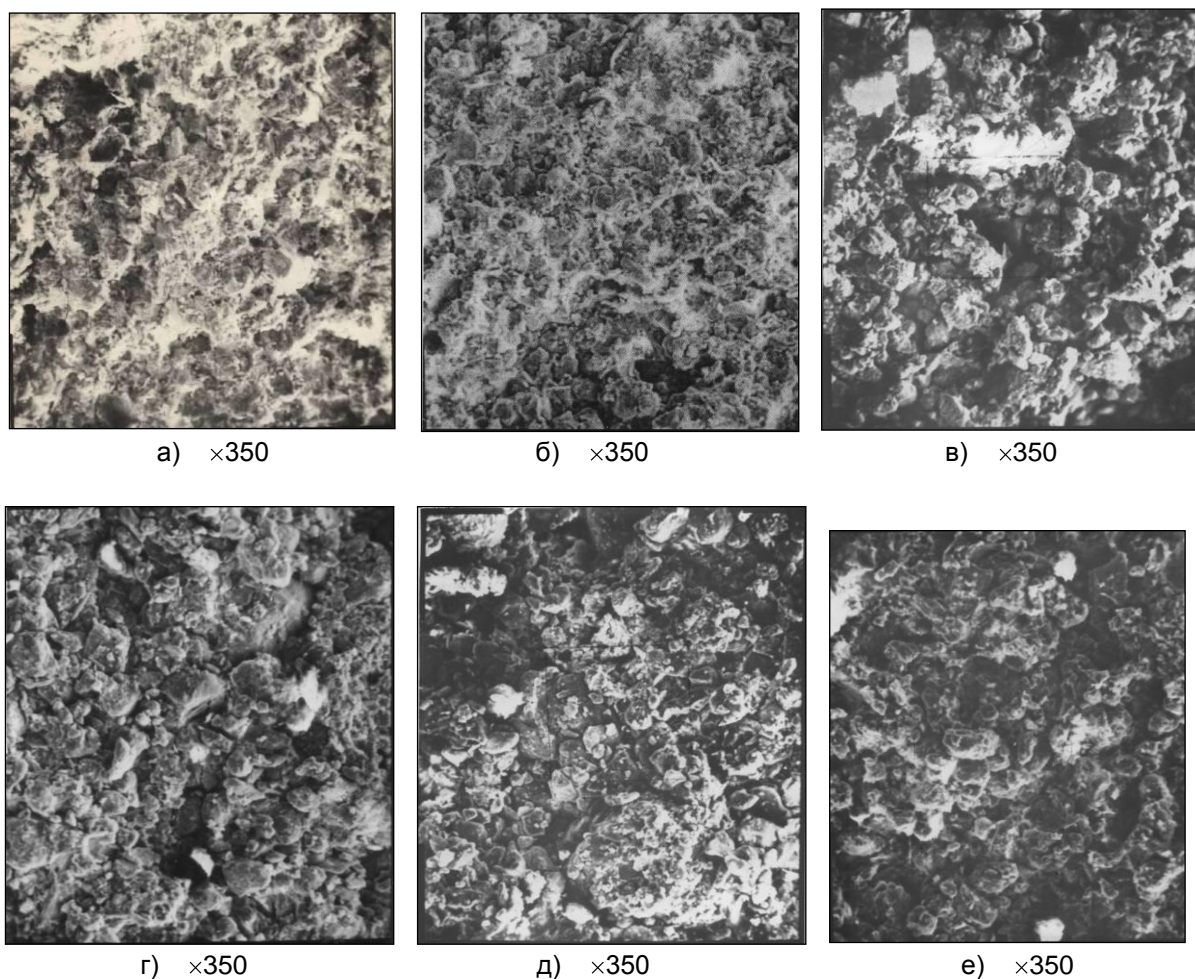


Рисунок 4 - Микроструктура лессового грунта после уплотнения трамбовкой массой 3,2 тонн на различной глубине:  
 а) с поверхности площадки; б) глубина 0,5 м; в) глубина 1,0 м;  
 г) глубина 1,5 м; д) глубина 2,0 м; е) глубина 3,0 м

Поровое пространство, как и в природном грунте, представлено крупными межмикроагрегатными порами, размер которых определяется размером зерен и агрегатов.

Показатели плотности сухого грунта ( $\rho_d$ ) и коэффициентов пористости ( $e$ ) с глубины от 1 до 3 м имеют значения близкие к грунту в естественном залегании.

Трамбование лессовых просадочных грунтов выполняется прежде всего для устранения из склонности к просадочным деформациям. Относительная просадочность грунта природного сложения и уплотненного трамбовкой массой 3,2 т равны соответственно 0,095 и 0,089, что говорит о невозможности устранения просадочных свойств грунта с применением трамбовок такой массы.

Следовательно, все вышесказанное позволяет сделать вывод, что уплотнение лес-

сового основания трамбовкой 3,2 т сказалось на микроструктурных и прочностных особенностях грунта только на поверхности площадки и глубине 0,5 м и подтверждает малую эффективность уплотнения лессового грунта трамбовками такого веса.

**На втором этапе эксперимента, после уплотнения площадки тяжелой трамбовкой массой 7 т,** отбирались образцы грунта через каждый метр до глубины 6 м. Выполнялось определение физико-механических характеристик и микроструктурных особенностей грунта на каждом горизонте (рисунок 5), при этом микроструктура образцов грунта описывалась качественно и проводился количественный анализ РЭМ-изображений с помощью разработанной на кафедре «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» программы «Promik».

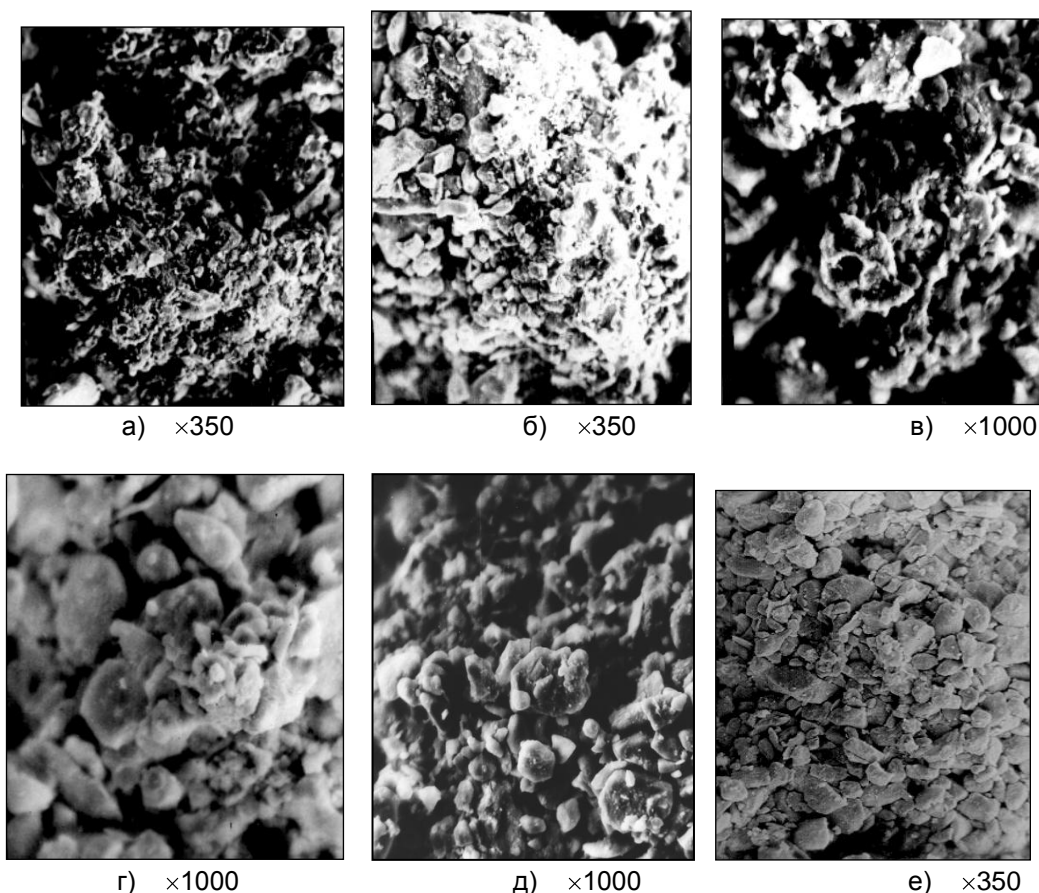


Рисунок 5 - Микроструктура лессового грунта после уплотнения трамбовкой массой 7 тонн на различной глубине:

а) глубина 1,0 м; б) глубина 2,0 м; в) глубина 3,0 м;  
г) глубина 4,0 м; д) глубина 5,0 м; е) глубина 6,0 м

*Цифровая обработка* полученных РЭМ-изображений лессового грунта выполнялась в несколько этапов.

*Первым этапом* производилось улучшение полутоновых изображений за счет выбора оптимальных параметров яркости, контрастности и насыщенности с применением метода адаптивного квантования мод и возможной регуляризацией изображения для сглаживания функции.

При использовании прямоугольного окна с основанием  $2b+1$  и высотой  $2h+1$  регуляризационный вариант функции  $g_w(i,j)$  имеет вид

$$g_w(i, j) = \frac{1}{(2b+1)(2h+1)} \sum_{-b \leq m \leq b} \sum_{-h \leq n \leq h} g(i+m, j+n).$$

В случае полутонового изображения регуляризация окна  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  позволяет довольно качественно провести фильтрацию высокочастотного шума, одновременно слабо искажая форму и границу объекта.

Для выделения на изображении границ отдельных участков, обладающих определенными свойствами, эти участки группировались в гистограмме распределения по признакам, отражающим определенные свойства изображаемых объектов, вокруг некоторых кластеров сгущения – мод. Выделив эти моды, минимизировав критерий частоты ошибки, выполнялось адаптивное квантование мод, т.е. поиск разделяющей их границы как пороговое значение признака.

*Вторым этапом* препарирования изображения стал перевод дискретных цифровых массивов в бинарную форму в соответствии с оптимальным уровнем бинаризации

$$f = \begin{cases} B[i, j] = 1, & \text{если } B[i, j] \in \text{объекту} \\ B[i, j] = 0, & \text{если } B[i, j] \notin \text{объекту} \end{cases},$$

где  $i, j$  – координаты точки в двумерном массиве яркостей.



Вычитание шумовой составляющей в бинарном изображении (рисунок 6) выполнялось с использованием методов низкочастотной фильтрации. В работе использованы две матрицы-маски сглаживающих массивов, которые не вызывают смещения средней яркости обработанного изображения

$$1) \text{ «квадратная»: } H = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix},$$

$$2) \text{ «крестообразная»: } H = \frac{1}{5} \begin{vmatrix} & & 1 & & \\ & & 1 & & \\ 1 & & 1 & & 1 \\ & & 1 & & \\ & & & & 1 \end{vmatrix}.$$



Рисунок 6 - Система формирования реального изображения

Для определения принадлежности отдельного элемента изображения к исследуемой области использовался принцип 4-связности элементов при сканировании элементов построчно, сверху вниз и слева направо. При таком алгоритме разметки обеспечивается выделение всех элементов, принадлежащих к участку при любой сложности формы этого участка.

Третьим этапом производилось определение геометрических и морфометрических параметров элементов изображения.

В качестве морфометрических характеристик объекта изображения были получены:

- Площадь элемента дискретного изображения, которая вычисляется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b(i, j),$$

где  $b(i, j)$  – значение бинарного изображения в точке, находящейся в  $i$ -той строке и  $j$ -том столбце. Здесь полагаем, что поле изображения разбито на прямоугольную решетку с  $m$  столбцами и  $n$  строками.

- Эквивалентный диаметр элемента плоского изображения, рассчитываемый по методу эквивалентного круга.

- Истинный периметр элемента, величина которого определяется путем отслежива-

ния по периметру объекта всех элементов с меткой. Величина эквивалентного периметра определяется через величину эквивалентного диаметра элемента.

- Для оценки формы элемента используется форм-фактор.

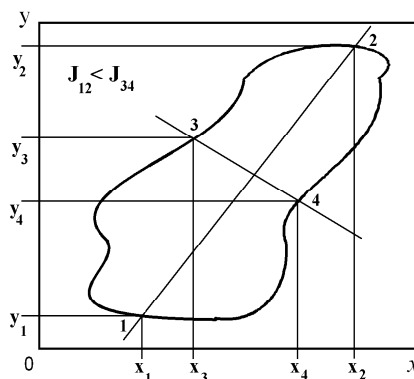
- Степень окатанности частицы характеризуется фактором поверхности. Он минимален для гладких элементов и резко возрастает, если рельеф последних огрубляется.

По данным морфометрических характеристик строились гистограммы распределения величин диаметра, площади, фактора формы согласно математическим законам статистики.

За геометрические характеристики объекта изображения принимались ориентация и вероятность максимальной ориентации. За ось ориентации принималась ось минимального второго момента, представляющей собой двумерный аналог оси наименьшей инерции. Положение любой оси можно задать координатами двух точек  $1(x_1, y_1)$ ,  $2(x_2, y_2)$ ,  $3(x_3, y_3)$ ,  $4(x_4, y_4)$  (рисунок 7) для двух осей, затем вычислить значения полуосей, являющихся осями инерции объекта

$$d_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2};$$

$$d_{34} = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}.$$



$J_{12}$  – момент инерции относительно оси 1-2,  $J_{34}$  – момент инерции относительно оси 3-4

Рисунок 7 - Ориентация области на изображении, определяемая направлением оси наименьшей инерции

За ориентацию принимается максимальная полуось. В случае равенства всех осей инерции можно считать, что объект изображения не имеет ориентации, т.е. имеет форму круга.

По данным анализа геометрических характеристик строится роза ориентации (рисунок 8). Важным параметром ориентации элементов является вероятность максимальной ориентации -  $P_{(\max \text{ ор.})}$ . Эта вероятность равна 1 для максимально ориентированных элементов и равна 0 - для не ориентированных.

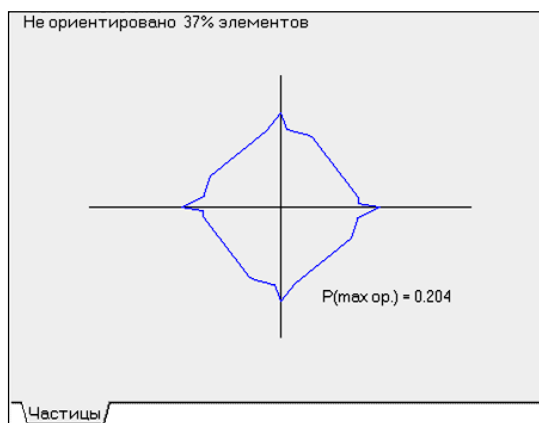
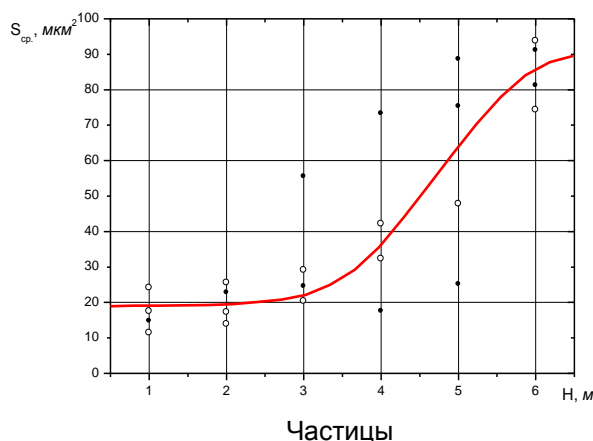


Рисунок 8 - Скрин-шот результата анализа геометрических характеристик частиц

В результате компьютерного анализа по программе «Promik» были получены данные морфометрических и геометрических характеристик лессового просадочного грунта (рисунок 5) по двум группам: порового пространства и частиц (твердых составляющих структуру грунта: глобул, микроагрегатов, зерен и т.п.) в виде гистограмм распределения и роз ориентации.



Все результаты были сведены в таблицы данных микроструктурной обработки РЭМ-изображений, по которым были построены графики зависимости средней площади элементов и вероятности максимальной ориентации от глубины (рисунки 9, 10).

### Результаты обработки РЭМ-изображения грунта по частицам.

По результатам компьютерного анализа частиц лессового грунта можно проследить изменение структуры грунта, в зависимости от глубины уплотняемой толщи, от матричного (1-2 м) до скелетного (4-6 м) типа.

Так, на глубине до 2 метров воздействие динамических импульсов при уплотнении трамбовкой массой 7 тонн привело к дроблению частиц на более мелкие элементы – глобулы, агрегаты, - с диаметром 0,4÷3 мкм (рисунок 11). Их число среди общего количества составляет определяющее положение – около 80%. На РЭМ-изображениях (рисунок 5, а, б) хорошо визуально наблюдается некоторое расплющивание отдельных глобул и агрегатов лессового грунта.

В образцах встречаются и довольно крупные частицы с диаметром 20÷30 мкм, но их число не велико. По суммарным площадям на этих глубинах лидируют элементы с диаметром 16÷25 мкм.

По результатам количественного анализа очертания частиц на глубине 1-2 м имеют довольно изрезанную неправильную форму, что является результатом частичного разрушения элементов структуры грунта под воздействием динамического уплотнения. На это же указывает наблюдаемая слабая ориентация частиц –  $P_{\max \text{ ор.}} = 0,130 \div 0,321$  (рисунок 12) при низком процентном содержании не ориентируемых элементов – 0÷12%.

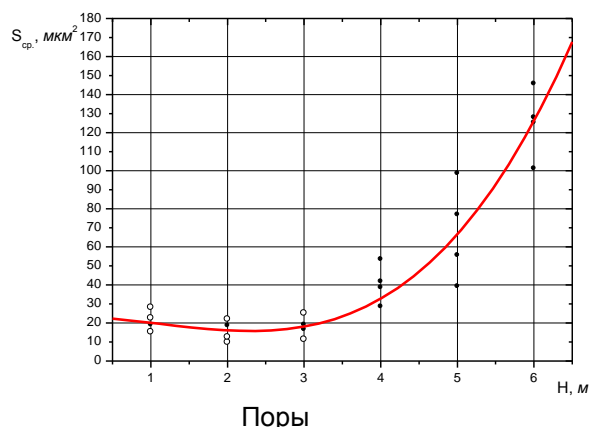


Рисунок 9 - График изменения средней площади элементов по глубине

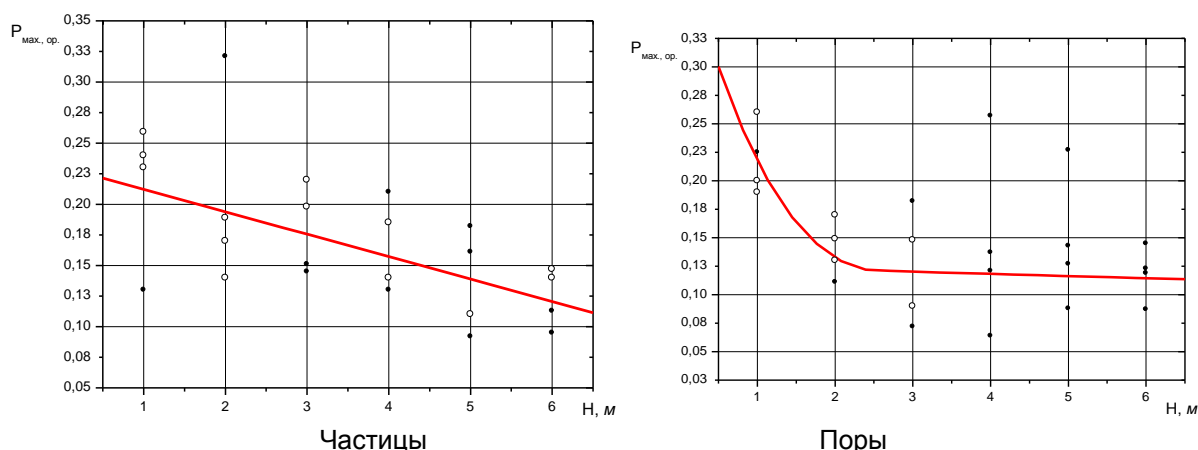


Рисунок 10 - График изменения вероятности максимальной ориентации элементов по глубине

На глубине 3 м отмечается постепенное уменьшение влияния уплотнения на структурные характеристики лессового просадочного грунта с глубиной. Поверхность элементов остается такой же изрезанной, но форма их становится все более близкой к окружности. Это подтверждается снижением величин  $P_{\text{max.op.}} = 0,145 \div 0,151$  и устойчивостью показателя процентного содержания не ориентированных элементов – 9%.

Все это позволяет оценить микроструктуру уплотненного грунта на глубине 3 м как скелетно-матричную. С увеличением глубины грунта с 4 до 6 м структура грунта все более приближается к природному сложению. Сказывается постепенное прекращение влияния трамбовки массой 7 тонн на дробление твердых составляющих элементов лессового грунта. Вследствие этого структуру грунта на глубине 4-6 м можно отнести к скелетному типу (по В.И. Осипову) [1].

В целом исследуемые образцы грунта можно охарактеризовать как слабо ориентированные, хотя по снижению показателя максимальной ориентации частиц можно говорить об изменении структуры грунта от более уплотненной толщи – менее 1 м, до постепенного прекращения влияния динамики ударов трамбовки – до 6 м и закономерно более.

#### Результаты обработки РЭМ-изображения грунта по порам.

Изменение структуры лессового просадочного грунта от матричного (глубина 1-2 м) до скелетного (4-6 м) типов с переходным этапом на глубине 3 метра так же хорошо прослеживается при количественном анализе порового пространства образцов.

До глубины 3 м средний диаметр пор не превышает в целом 3,5 мкм (рисунок 13). Среди общего количества элементов число мелких пор велико – даже по доле суммарных площадей они занимают лидирующее положение. Это объясняется тем, что грунт приобрел более плотную структуру.

Начиная с глубины 3 м, элементы порового пространства начинают постепенно увеличиваться в размерах. Эти изменения хорошо прослеживаются на графике зависимости средней площади пор от глубины взятия образцов грунта (рисунок 10), уплотненного трамбовкой массой 7 тонн. Вероятность максимальной ориентации пор резко снижается почти до глубины 3 м (рисунок 10), а далее наблюдается постепенное уменьшение этого показателя.

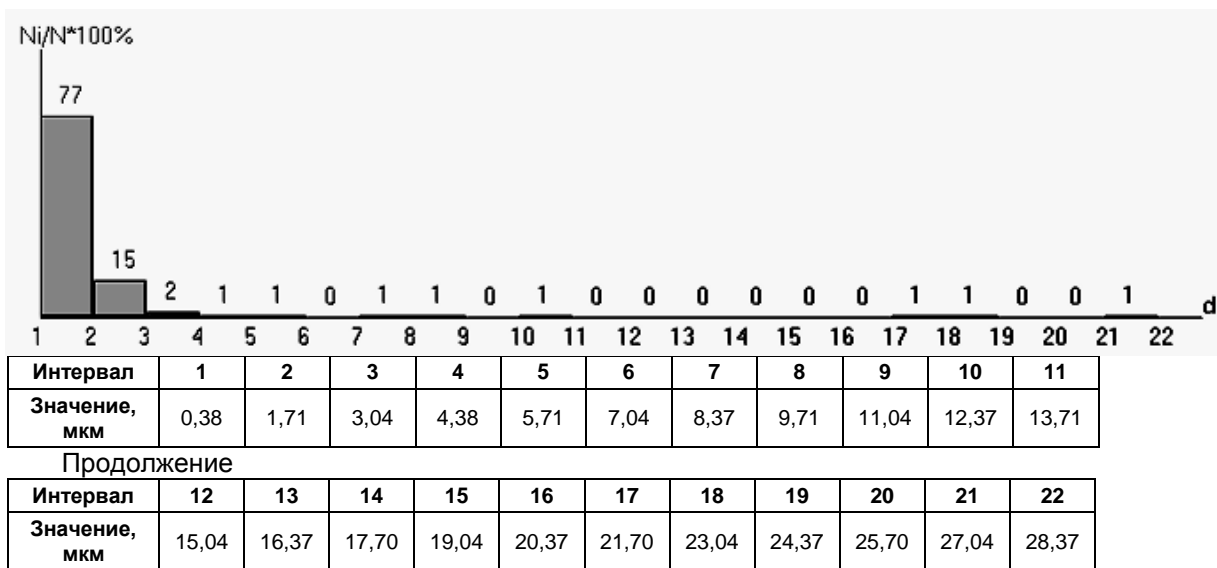
Все это говорит о постепенном прекращении влияния уплотнения трамбовкой массой 7 тонн с глубины 3 м. При этом микроструктура лессового грунта на глубине 3 м может рассматриваться как переходный этап между двумя наблюдаемыми структурами: матричной и скелетной.

На основе проведенных исследований лессового грунта Верхнего Приобья (на примере г. Барнаула) в естественных условиях и после уплотнения трамбовками различной массы можно сделать следующие выводы.

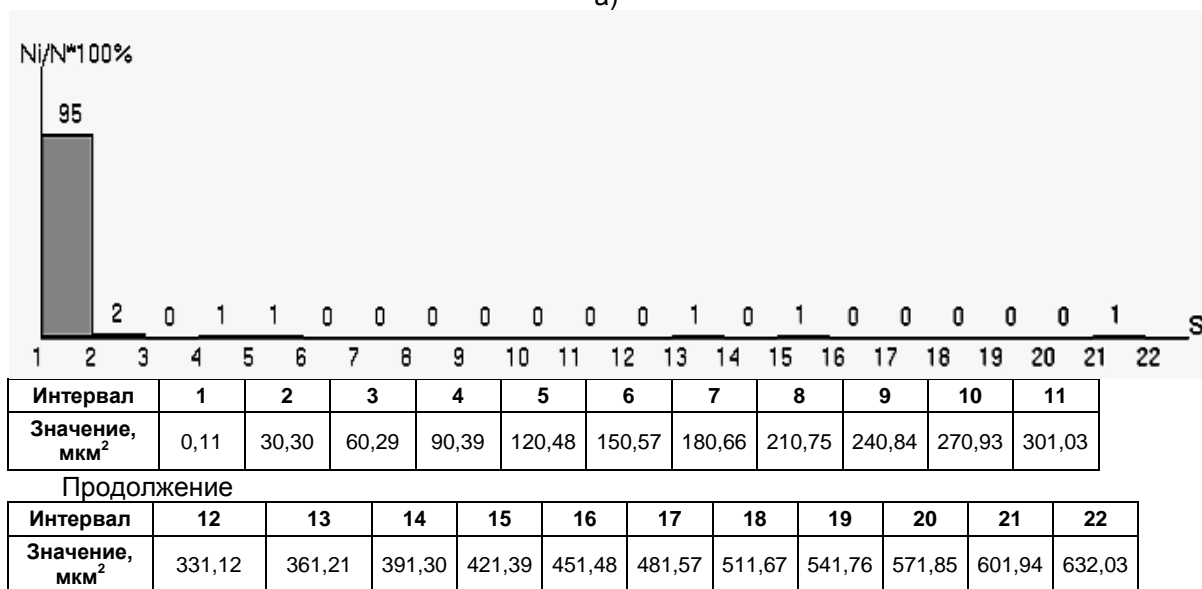
#### ВЫВОДЫ:

1. Под влиянием уплотнения лессового грунта обычной трамбовкой массой 3,2 т не происходит принципиального изменения структуры грунта глубже 0,5 м и не достигается получение уплотненной зоны необходимой мощности. Проведенные микроструктурные исследования и данные по плотности,

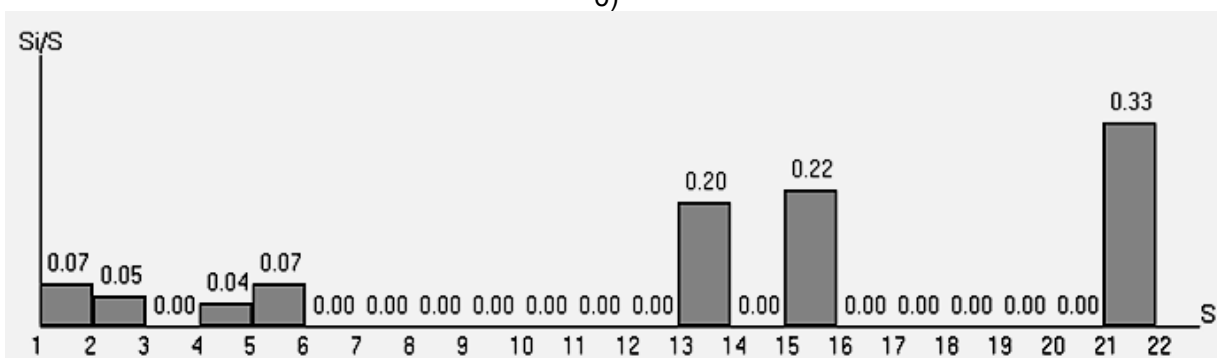
МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ВЕРХНЕГО ПРИОБЬЯ  
(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БАРНАУЛА)



а)



б)



в)

а) по диаметрам; б) по площадям; в) по суммарным площадям

Рисунок 11 - Гистограммы распределения частиц на глубине 2,0 м



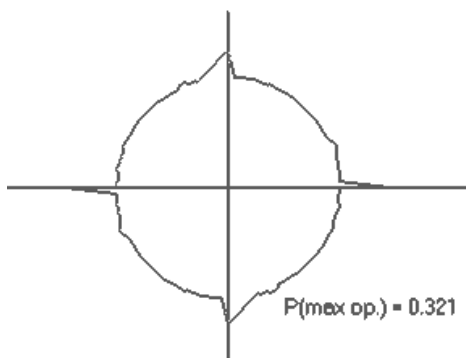
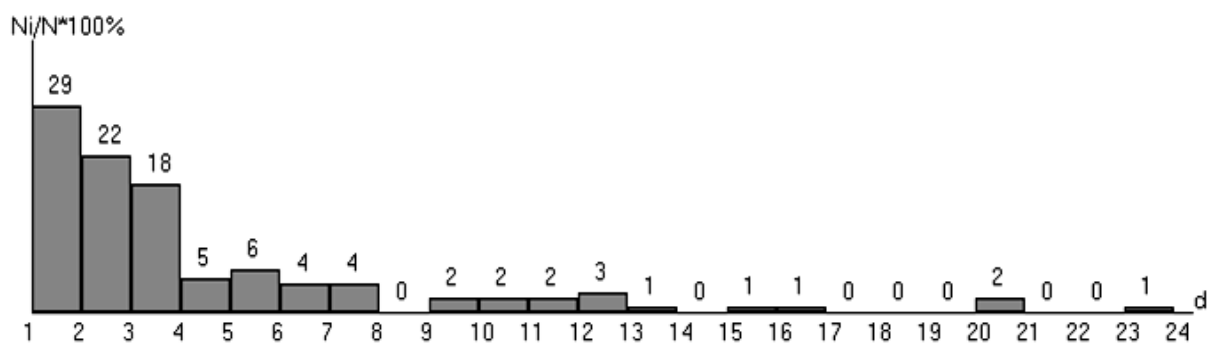


Рисунок 12 - Ориентация частиц на глубине 2 метра

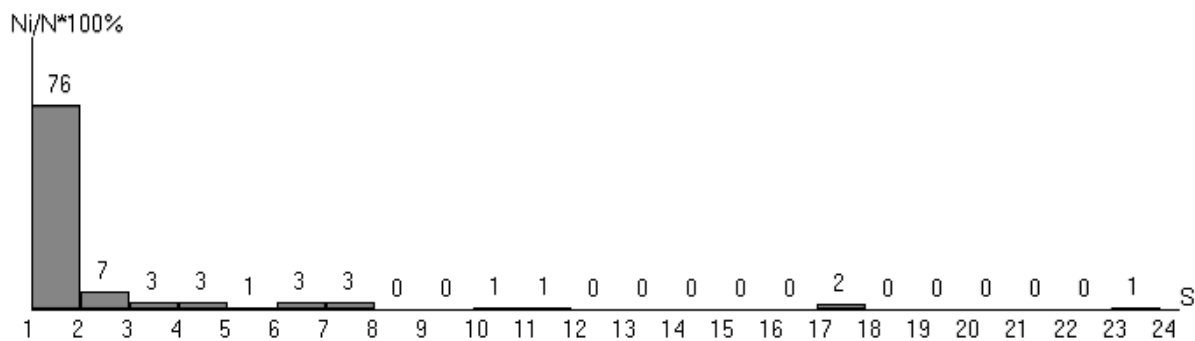


Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значение, мкм	0,48	1,28	2,08	2,88	3,69	4,49	5,29	6,09	6,90	7,70	8,50	9,30

Продолжение

Интервал	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Значение, мкм	10,10	10,91	11,71	12,51	13,31	14,11	14,92	15,72	16,52	17,32	18,13	18,93

а)



Интервал	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значение, мкм <sup>2</sup>	0,18	12,40	24,63	36,86	49,08	61,31	73,53	85,76	97,98	110,21	122,43	134,66

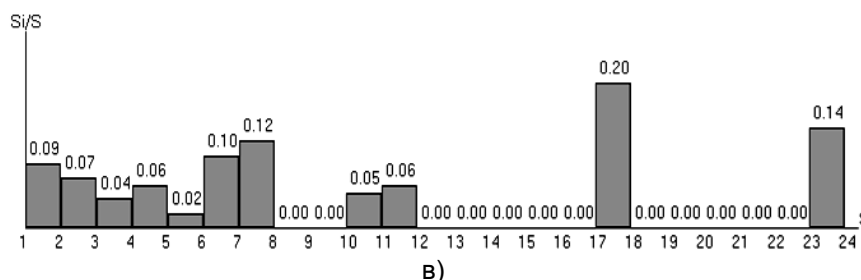
Продолжение

Интервал	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Значение, мкм <sup>2</sup>	146,89	159,11	171,34	183,56	195,79	208,01	220,24	232,46	244,69	256,91	269,14	281,37

б)

а) по диаметрам; б) по площадям;

Рисунок 13 - Гистограммы распределения пор на глубине 2,0 м



в) по суммарным площадям

Продолжение Рисунка 13 - Гистограммы распределения пор на глубине 2,0 м

пористости грунта и модуля деформации подтверждают малую эффективность уплотнения лессового грунта трамбовками массой 3,2 т.

2. Уплотнение лессового грунта тяжелыми трамбовками массой 7 т приводит к коренному изменению его микроструктуры. Под действием динамической нагрузки происходит максимальное сближение элементарных частиц грунта, сопровождающееся процессом частичного и полного разрушения агрегатов и микроагрегатов. В результате максимального уплотнения формируется новая матричная структура, отличающаяся от природной минимальной и относительно однородной пористостью массы взаимно заклинившихся частиц, получивших наиболее плотную упаковку и увеличение числа контактов между ними. Это приводит к устранению просадочных свойств лессового основания и повышению его прочностных и деформационных характеристик.

3. Исследование уплотненного грунта на микроструктурном уровне позволило проследить динамику изменения основных структурных элементов лессового грунта – песчано-пылеватых частиц, глинистого материала и пористости на различных горизонтах уплотненной толщи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. академика Е.М. Сергеева - М.: Недра, 1989. - 211 с.

*Вяткина Е.И. – к.г.-м.н., доцент, Карелина И.В. – к.т.н., доцент, Хоменко В.А. – д.т.н., профессор, Тищенко А.И. – д.т.н., профессор, Алтайский государственный технический университет, E-mail: stf-ofigig@mail.ru.*

УДК 666.952.2

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОКАЛЬЦИЕВЫХ ЗОЛ ТЭЦ

Р.И. Гильмияров, Ю.В. Щукина, Г.И. Овчаренко, А.О. Демченко, Е.Е. Агашкина

*Представлены результаты использования вяжущих на основе высококальциевой золы ТЭЦ от сжигания Канско-Ачинских бурых углей в производстве автоклавных газобетонов с уменьшением доли вводимой товарной извести. Исследован фазовый состав золосодержащего газобетона.*

*Ключевые слова: высококальциевые золы ТЭЦ, золопортландцемент, автоклавный газобетон, рентгенофазовый и дифференциально-термический анализ, состав камня.*

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в строительстве используется множество различных стеновых материалов, отличающихся прочностными и

теплоизоляционными характеристиками. Одним из наиболее эффективных и востребованных материалов, используемых для возведения ограждающих конструкций, является