

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ЗАМАЧИВАНИЯ И СИЛИКАТИЗАЦИИ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В РЕГИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF INFLUENCE OF LOESS SOILS SOAKING AND SILICATION METHODS ON CHANGES OF THEIR SEISMIC PROPERTIES IN REGIONAL CONDITIONS OF UZBEKISTAN

УДК 624.121.537

DOI 10.25296/1993-5056-2017-4-72-80



### МАВЛЯНОВА Н.Г.

Главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, д.г.-м.н., г. Москва, georisk2015@mail.ru

### ИСМАИЛОВ В.А.

Ведущий научный сотрудник лаборатории инструментальной сейсмологии Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан, к.г.-м.н., г. Ташкент, Узбекистан, vakhit.mbm@mail.ru

### ЛАРИОНОВА Н.А.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, nin.larionowa@yandex.ru

### Ключевые слова:

лессовые грунты; замачивание; силикатизация; продольные и поперечные волны; сейсмическая интенсивность.

### Аннотация

В работе приведены результаты исследований по использованию методов замачивания и силикатизации для улучшения физико-механических свойств лессовых грунтов при строительстве в сейсмически опасных районах. Установлено, что предварительное замачивание и силикатизация лессовых грунтов повышают их сейсмостойкость, причем в изученных региональных условиях эффект силикатизации оказывается существенно выше. Выявлены определенные преимущества исследованных методов и возможность их широкого использования при подготовке оснований для строительства или их усиления на застроенной территории в сейсмически опасных районах.

### MAVLYANOVA N.G.

Chief researcher of Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, georisk2015@mail.ru

### ISMAILOV V.A.

Leading researcher of the Laboratory of Instrumental Seismology, Mavlyanova Institute of Seismology, Academy of Science of the Republic of Uzbekistan, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Tashkent, Uzbekistan, vakhit.mbm@mail.ru

### LARIONOVA N.A.

Senior researcher of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, nin.larionowa@yandex.ru

### Key words:

loess soils; soaking silication; primary and secondary seismic waves; seismic intensity.

### Abstract

The paper presents the results of researches, devoted to the application of the soaking and silication methods for improving physical-mechanical properties of loess during construction in seismicity-prone areas. Both pre-soaking and silication of loesses increase their seismic stability. Meanwhile, the effect of silication is significantly higher in local conditions. The authors have proved experimentally the certain advantages of the discussed methods and their applicability to improving ground conditions for the construction of new or reinforcing of existing buildings in seismicity-prone areas.

## Введение

Лессовые породы как основания для зданий и сооружений являются своеобразной средой распространения сейсмических волн. Включение территорий, сложенных просадочными лессовыми грунтами, в сферу инженерной деятельности порождает необходимость надежной оценки поведения этих грунтов в качестве оснований инженерных сооружений в условиях повышенной сейсмической активности. Для устранения просадочных свойств применяются различные методы технической мелиорации и конструктивные мероприятия. При проведении проектно-изыскательских работ для целей строительства в сейсмически опасных районах необходимо учитывать, что сейсмические характеристики лессовых пород являются переменными и зависят от состояния окружающей среды в данный момент времени.

Применение методов технической мелиорации позволяет существенно улучшить физико-механические свойства лессовых грунтов и устранить их просадочность на небольших площадях, соизмеримых с площадью застройки. Устройство искусственного основания приводит к изменению категории грунта по сейсмическим свойствам. Следовательно, улучшая сейсмические свойства оснований противопросадочными мероприятиями, можно уменьшить величину ожидаемого сейсмического воздействия на здания или сооружения.

Однако проблема уменьшения проявлений сейсмических воздействий на проектируемые здания и сооружения зависит от многих факторов, таких как состояние и свойства естественных грунтовых толщ, способ инженерной подготовки основания, размеры (площадь и глубина) фундамента, качество и длительность проводимых работ по улучшению свойств грунтов. В статье приводятся результаты исследований по изучению влияния методов замачивания и силикатизации на изменение сейсмических свойств лессовых грунтов на строительных площадках. Исследования проводились в сейсмически активных центральной и восточной частях Узбекистана, где широко распространены лессовые породы. В частности, метод силикатизации применялся на территории г. Ташкента, а замачивание лессового основания проводилось в г. Пскенте (Ташкентская область).

## Теоретический анализ

Региональная геологическая особенность Узбекистана состоит в том, что территория страны разделяется на два тектонических региона: Тянь-Шанский горно-складчатый (восточный Узбекистан) и Туранская плита (западный Узбекистан). Значительный объем строительства в республике проводится в сейсмически активной горно-складчатой области, где сосредоточены очаги землетрясений с магнитудами до 7,5 [1]. Районы широкого распространения лессовых пород с мощностью от 5–10 до 100 м расположены именно в этой области или в непосредственной близости от нее.

В 2012 г. в Узбекистане в качестве нормативной утверждена карта Общего сейсмического районирования — ОСР-2011, созданная на вероятностной основе. Но в июле 2016 г. ее действие приостановлено в связи с тем, что проектировщики не владеют навыками работы с вероятностными картами и не разработан новый СНиП, учитывающий влияние вероятностной оценки сейсмической опасности на организацию конструктивных мероприятий. В настоящее время для сейсмостойкого строительства на

всей территории Узбекистана используются имеющиеся карты сейсмического микрорайонирования, а также «Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах» (КМК 2.01.03-96) [14], утвержденные Госкомитетом Республики Узбекистан по архитектуре и строительству в 1996 г. (актуальны на 2017 г.). В приложении 1 к СНиП приведен список из 361 населенного пункта Республики Узбекистан, расположенных в сейсмических районах, с указанием определенной для них интенсивности и повторяемости сейсмических воздействий. Для определения категорий грунта по сейсмическим свойствам в СНиП приведена таблица, согласно которой:

- лессовые грунты (лессовидные суглинки, супеси и глины) с коэффициентом пористости  $e < 0,8$  при показателе консистенции  $I_L \leq 0,5$  или со скоростью распространения сейсмических волн  $V_p > 500$  м/с и  $V_s > 300$  м/с относятся ко II категории грунтов по сейсмическим свойствам;
- лессовидные грунты (лессы, лессовидные суглинки, супеси и глины) с коэффициентом пористости  $e \geq 0,8$  или с коэффициентом пористости  $e < 0,8$  при значении показателя консистенции  $I_L > 0,5$  или со скоростью распространения сейсмических волн  $V_s \leq 300$  м/с относятся к III категории грунтов по сейсмическим свойствам.

Также в этих строительных нормах указывается, что при отсутствии данных об инженерно-геологических свойствах грунтов при уровне грунтовых вод выше 5 м песчаные, глинистые и насыпные (песчаные и пылевато-глинистые) грунты следует относить к неблагоприятным в сейсмическом отношении. При необходимости строительства на таких площадках для уточнения категории грунтов по сейсмическим свойствам следует проводить детальные инженерно-геологические изыскания или инженерно-геофизические исследования.

В работе [6] отмечено, что особенность проявления сейсмической интенсивности на лессовых территориях — это прежде всего резкое изменение скоростей распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн в зависимости от влажности, пористости, химико-минералогического состава грунтов и внешних факторов. Эти параметры используются для обоснования приращения сейсмического балла  $\Delta I$  на строительных площадках относительно «среднего грунта», который подбирается индивидуально для каждого населенного пункта в соответствии с таблицей в строительных нормах [14]. При этом сейсмические свойства специфических грунтов слабо освещены в научно-технической литературе. Для изучения сейсмических свойств лессовых и глинистых грунтов институт ПНИИИС Госстроя СССР в 1984 г. составил два кратких руководства [11, 12], которыми и ограничивается нормативная база по данному вопросу. С тех пор систематическое изучение сейсмических свойств структурно-неустойчивых грунтов не получило своего развития [3]. На особенности проявления сейсмического эффекта в лессовых породах указывал Г.А. Мавлянов [8]. В статье «О задачах инженерно-геологического изучения лессовых пород» он определил 15 задач изучения лессовых пород, каждая из которых получила свое развитие в науке. Одной из них является необходимость разработки для сейсмических районов методов прогноза просадочных явлений в условиях динамических нагрузок.

В работах [2, 15] подчеркивается, что устранение или ликвидация просадочных свойств грунтов достигается

применением различных методов уплотнения или укрепления, направленных на изменение природной структуры грунтов, повышение плотности, улучшение их прочностных и деформационных свойств, что, в свою очередь, изменяет расчетную сейсмичность площадки строительства. Среди методов уплотнения существуют и используются трамбование и предварительное замачивание, а для ликвидации просадочности и повышения прочности применяются: однорастворная силикатизация для физико-химически активных лессовых грунтов, газовая силикатизация, силикатизация двухкомпонентная с использованием гелеобразующих растворов преимущественно для неактивных лессовых грунтов; метод аммонизации используется для ликвидации просадочности. Существуют также методы зашелачивания (широко применяется) и смолизации (используется редко).

Расчетная сейсмичность строительной площадки определяется в период проектирования сооружения, а изменение сейсмических свойств лессовых грунтов после применения противопросадочных мероприятий проектировщиками не учитывается. Между тем оценка этих изменений крайне важна, необходимо изучать факторы взаимодействия системы «грунт — сооружение» и, имея технические параметры проектируемых сооружений, целесообразно использовать инженерную подготовку грунтовых оснований, регулируя их сейсмические свойства, с целью предотвращения резонансных явлений и ослабления сейсмического эффекта, что позволит снизить экономические и трудовые затраты на конструктивные усиления сооружений.

### Методика исследований

Влияние инженерной подготовки лессовых оснований на изменение сейсмической интенсивности строительной площадки изучено полевыми инженерно-геологическими и геофизическими методами, а также в образцах грунтов в лабораторных условиях. Приращения сейсмической интенсивности ( $\Delta I$ ) рассчитаны методами сейсмической жесткости и сопоставления амплитуд сейсмических колебаний.

При оценке  $\Delta I$  методом сейсмических жесткостей учитывается отношение сейсмической жесткости грунтов в верхней части разреза исследуемого участка к сейсмической жесткости грунтов на эталонном участке. По данным сейсморазведочных исследований приращение сейсмической интенсивности определялось по известной формуле [9]:

$$\Delta I = 1,67 (V_{sz} \cdot \rho_s / V_{si} \cdot \rho_i), \quad (1)$$

где  $V_i$  и  $\rho_i$  — соответственно средняя скорость распространения волны  $V_s$  и средняя плотность пород в слоях грунтовой толщи под  $i$ -м пунктом наблюдения;  $V_s$  и  $\rho_s$  — соответственно средняя скорость распространения волны  $V_s$  и средняя плотность пород в слоях эталонной толщи со средними грунтовыми условиями.

Определение  $\Delta I$  по данным сейсмических колебаний грунта от слабых землетрясений и микросейсм основано на сопоставлении амплитуд смещения (скорости, ускорения) сейсмических колебаний на исследуемом и эталонном грунтах с использованием формулы:

$$\Delta I = 3,3(A_{i \max} / A_{o \max}), \quad (2)$$

где  $A_{i \max}$ ,  $A_{o \max}$  — максимальные амплитуды колебаний соответственно на исследуемом и эталонном грунтах.

Полевые исследования проведены непосредственно в строительных котлованах до применения противопросадочных мероприятий и после их проведения. Такая же схема использована при лабораторных определениях свойств грунтов. Инженерно-геологические, сейсморазведочные и сейсмометрические исследования выполнены по существующей рекомендации для сейсмического микрорайонирования [10] и согласно принятым в республике нормативным документам [14].

В лабораторных условиях определялись состав, физические и физико-механические свойства грунтов (в том числе гранулометрический состав, плотность скелета, влажность, границы текучести и раскатывания, коэффициент фильтрации, сжимаемость и сопротивление срезу).

Известно, что в основе метода силикатизации лежат обменные процессы, но прямой зависимости эффективности укрепления с величиной емкости обмена не прослеживается. Поэтому оценка физико-химической активности лессовых грунтов проводилась по методу В.Е. Соколовича [13], то есть на основе определения емкости поглощения, которая для исследованных лессовых грунтов в среднем составляет 15–20 мг-экв/100 г грунта, что позволяет их отнести к группе переходных в физико-химическом отношении.

### Экспериментальная часть

**Метод предварительного замачивания.** Еще в 70-х годах прошлого столетия для изучения влияния сейсмических воздействий на просадки в лессовых породах проведен ряд исследований [5, 6] на опытных котлованах методом предварительного замачивания. В результате установлены зависимости величины просадки от параметров сейсмического колебания грунтов.

Исследования по влиянию метода предварительного замачивания лессовых грунтов на изменение  $\Delta I$  были проведены на площадке строительства жилого трехэтажного дома в Ташкентской области. Площадка сложена пролювиальными лессовыми грунтами среднего неоплейстоцена Ташкентского комплекса ( $L_p Q_{II} ts$ ) мощностью более 30 м, глубина уровня грунтовых вод ниже 22–23 м. Лессовые грунты до исследуемой глубины (14 м) характеризуются рядом показателей, приведенных в табл. 1.

Расчетная величина просадки составила 81 см. Предварительное замачивание лессового грунта проводилось в котловане размером 48x12 м и глубиной 1,8 м. На дне котлована на разных глубинах устанавливались реперы для регистрации величины просадки. Для ускорения процесса замачивания были пробурены скважины до глубины 4–8 м. Замачивание лессовой толщи в строительном котловане проводилось в течение трех месяцев. При этом максимальная величина просадки от собственного веса грунта составила 58 см. Исследования продолжались и в процессе осушения толщи. В целом проведено пять этапов комплексных исследований инженерно-геологических и сейсмических свойств грунтов до глубины 14 м: 1-й этап — до замачивания лессовой толщи; 2-й — через месяц после замачивания; 3-й — через два месяца; 4-й — через год; 5-й — через год и девять месяцев, перед строительством трехэтажного кирпичного дома (рис. 1).

**Метод силикатизации.** Одним из эффективных способов инженерной подготовки основания является химическое закрепление, в частности силикатизация лессовых грунтов. Исследования по оценке влияния разных модификаций метода силикатизации на изменение физико-механи-

Таблица 1

Результаты изменения показателей свойств грунтов при предварительном замачивании					
Показатели свойств грунтов	Этапы исследования				
	I этап (до замачивания)	II этап (через 1 месяц после замачивания)	III этап (через 2 месяца после замачивания)	IV этап (через 12 месяцев после замачивания)	V этап (через 21 месяц после замачивания)
Плотность грунта ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup>	$\frac{1,41 \div 1,63}{1,49}$	$\frac{1,57 \div 1,82}{1,64}$	$\frac{1,56 \div 1,79}{1,67}$	$\frac{1,63 \div 1,79}{1,73}$	$\frac{1,69 \div 1,85}{1,78}$
Плотность сухого грунта ( $\rho_d$ ), г/см <sup>3</sup>	$\frac{1,32 \div 1,42}{1,37}$	$\frac{1,31 \div 1,45}{1,36}$	$\frac{1,33 \div 1,47}{1,39}$	$\frac{1,45 \div 1,51}{1,50}$	$\frac{1,53 \div 1,61}{1,60}$
Влажность ( $W$ ), %	$\frac{7,6 \div 12,8}{9,3}$	$\frac{19,9 \div 25,3}{22,6}$	$\frac{17,6 \div 22,9}{20,9}$	$\frac{12,3 \div 18,7}{15,2}$	$\frac{10,7 \div 14,7}{11,4}$
Пористость ( $n$ ), %	$\frac{46,6 \div 51,2}{48,1}$	$\frac{43,1 \div 46,7}{45,3}$	$\frac{41,5 \div 45,4}{44,5}$	$\frac{39,3 \div 44,9}{41,8}$	$\frac{37,8 \div 41,4}{40,2}$
Скорость продольных волн ( $V_p$ ), м/с	$\frac{380 \div 550}{400}$	$\frac{250 \div 420}{280}$	$\frac{310 \div 460}{340}$	$\frac{530 \div 740}{670}$	$\frac{680 \div 880}{830}$
Скорость поперечных волн ( $V_s$ ), м/с	$\frac{220 \div 300}{240}$	$\frac{110 \div 180}{170}$	$\frac{130 \div 210}{190}$	$\frac{280 \div 360}{310}$	$\frac{330 \div 440}{370}$
Отношение скоростей волн ( $V_p/V_s$ )	1,6–1,8	2,2–2,7	2,0–2,9	1,9–2,0	1,9–2,0
Сейсмическая жесткость ( $V_{si} \rho_i$ )	350	280	320	535	660
Приращения сейсмической бальности $\Delta I$	+0,50	+0,66	+0,57	+0,20	+0,04

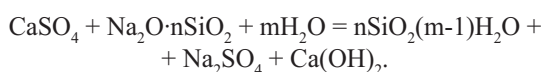
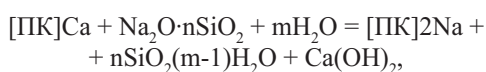
Примечание: в числителе приведены предельные значения показателей свойств лессовых грунтов, в знаменателе — средние значения.

ческих и сейсмических свойств лессовых грунтов проведены на двух строительных площадках в г. Ташкенте.

— При строительстве зданий Национального банка Узбекистана проведена односторонняя силикатизация грунтов. Мощность просадочной толщи лессовых грунтов составляла 15 м. Инъекция раствора (плотностью 1,15 г/см<sup>3</sup>) производилась по схеме сверху вниз заходами (1–2 м) с расходом раствора 15–20 л/мин. Инъекционные скважины располагались на расстоянии 2,2 м друг от друга (рис. 2).

— При усилении оснований аварийного здания Государственного проектного института № 4 закрепление просадочной толщи (в интервале глубин 3,5–9,5 м) проводилось методом газовой силикатизации с предварительной активизацией грунтов углекислым газом. Общая мощность просадочной толщи составила 9,5 м. Применение такого метода обусловлено повышенной влажностью просадочных лессовых грунтов в данном регионе.

При взаимодействии силиката натрия с лессовым грунтом в результате обменных процессов на поверхности частиц и агрегатов образуются тонкие пленки геля кремниевой кислоты. Физико-химические процессы, происходящие при укреплении лессовых грунтов, могут быть представлены в виде реакций:



Пленки геля кремниевой кислоты, образующиеся в результате физико-химических процессов, обеспечивают

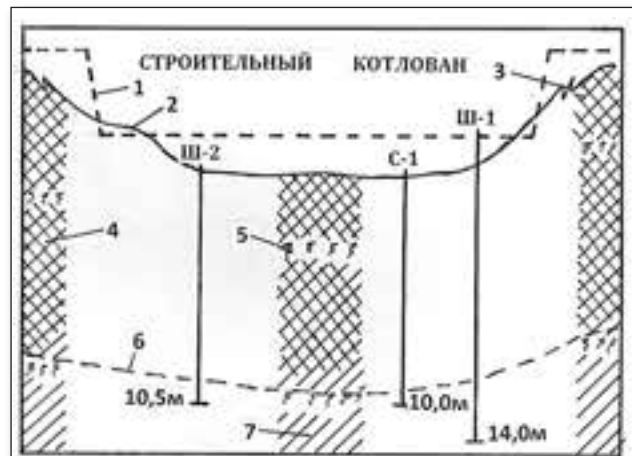


Рис. 1. Схема уплотнения лессовых оснований методом предварительного замачивания на строительном котловане. Обозначения: 1 — контуры котлована до замачивания; 2 — контуры котлована после замачивания; 3 — боковые трещины просадки; 4 — уплотненный грунт; 5 — погребенный почвенный горизонт; 6 — условная глубина искусственного водонасыщения; 7 — естественный грунт; С — скважина, Ш — шурф

неразмокаемость и сохранение структуры грунта в ненарушенном состоянии, ликвидацию просадочности. Непрореагировавшая часть раствора силиката натрия в порах лессового грунта поликонденсируется, и образует гель кремниевой кислоты, который тампонирует капилляры, вследствие чего пористость и проницаемость грунта значительно снижаются. Не полностью вступивший в реакции с компонентами грунта силикат натрия обеспечивает присутствие в поровом растворе  $\text{Na}_2\text{O}$ , который впоследствии переходит в  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , за счет чего создается

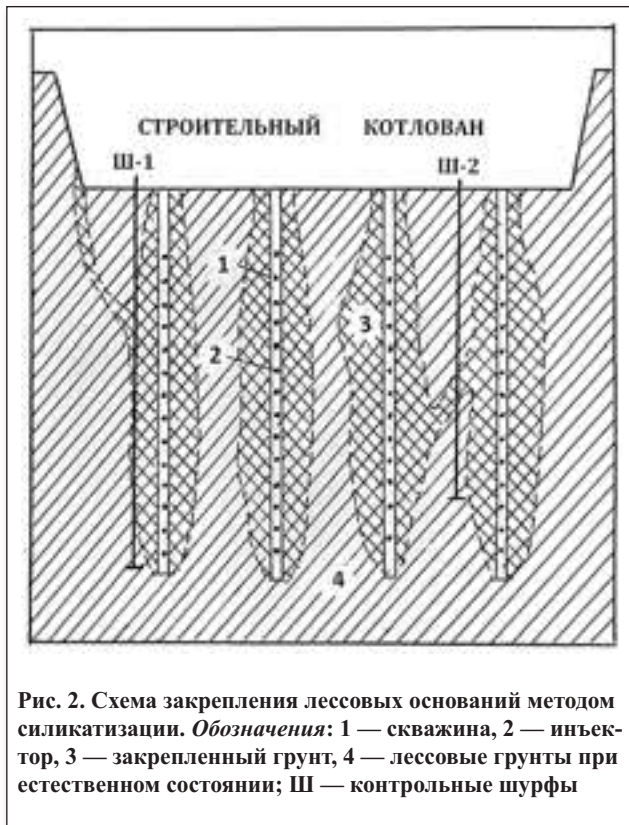


Рис. 2. Схема закрепления лессовых оснований методом силикатизации. Обозначения: 1 — скважина, 2 — иньектор, 3 — закрепленный грунт, 4 — лессовые грунты при естественном состоянии; Ш — контрольные шурфы

высоко щелочная среда (pH = 10–11). Формирование микрослоя цементирующих новообразований обеспечивает повышение прочности грунта до 1,3–1,5 МПа. Наряду с этим повышаются показатели скоростей продольных и поперечных волн практически в 2 раза по сравнению с исходным грунтом [4].

**Результаты и обсуждение**

Исследования проводились на лессовидных суглинках, в которых содержание глинистой фракции (< 0,002 мм) изменялось в широких пределах — от 9 до 28% (в среднем 18%). Глинистая фракция представлена преимущественно гидрослюдыстыми минералами, в качестве примесей присутствуют каолинит, хлорит, в незначительном количестве монтмориллонит. Содержание карбонатов в грунтах колеблется от 18 до 33%.

В период предварительного замачивания в зоне увлажнения происходит суффозионный вынос тонкодисперсных частиц грунта. Гранулометрический анализ показал, что после замачивания содержание пылеватых фракций диаметром 0,002–0,05 мм и глинистых частиц < 0,002 мм уменьшилось на 2–3%, но несколько увеличилось присутствие более крупных фракций. При замачивании отмечается значительная перестройка структуры лессовых грунтов. Насыщение их водой приводит к быстрой потере структурного сцепления (C = 2–5 кПа), снижению угла внутреннего трения на 4–8°, размоканию и уплотнению [2].

При длительном увлажнении в лессовых грунтах происходит процесс растворения и выноса водорастворимых солей (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). В течение первых 8–10 дней наиболее интенсивно растворяются и выносятся легкорастворимые соединения, а затем преобладает вынос среднерастворимых солей — гипса. При замачивании массива в течение 60 суток в результате выщелачивания и выноса солей величина сухого остатка уменьшается вдвое, а через 6 месяцев содержание водорастворимых солей в грунтах уменьшается в

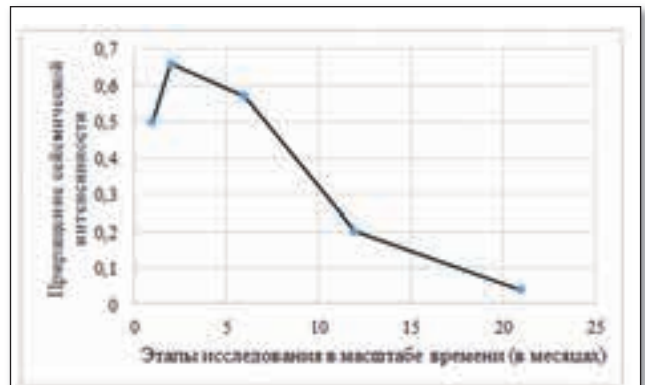


Рис. 3. Изменение приращения сейсмической интенсивности лессового основания при длительном предварительном замачивании массива

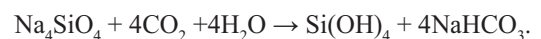
5 раз, достигая 0,1–0,2 г/100 г грунта. На исследованном объекте, по данным анализа водных вытяжек, установлено, что величина плотного остатка грунта уменьшается от 1,058 до 0,752%, то есть на 0,30–0,33%, при этом в большей степени прослеживается снижение содержания ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup>, примерно, на 1,5–2%.

В табл. 1 даны результаты поэтапного изучения физических и сейсмических свойств лессовых грунтов. Результаты исследования показывают тенденцию в изменении их физических свойств в процессе осушения.

Проведенные расчеты ΔI для естественного лессового грунта и после его замачивания показывают увеличение значения ΔI до более чем +0,6 балла непосредственно после замачивания в течение двух-трех месяцев. В процессе последующего осушения происходит постепенное снижение ΔI. Так, спустя год после замачивания лессовой толщи ΔI составило +0,2, а еще примерно через год оно уменьшилось и достигло +0,04 балла (рис. 3).

При расчете ΔI в качестве «средних грунтов» взята лессовая толща мощностью до 30 м с плотностью 1,75 г/см<sup>3</sup> и скоростью поперечных сейсмических волн V<sub>s</sub> = 400 м/с, которые приняты при сейсмическом микрорайонировании г. Ташкента в 1984 г. Установлено, что ΔI лессовых грунтов при использовании метода предварительного замачивания снижается более чем на 0,45 балла. При увеличении длительности осушения примерно еще на один год можно фиксировать снижение расчетной сейсмичности площадки строительства на 1 балл, если учесть тот факт, что процесс осушения лессовой толщи после замачивания длится до 10 лет [6].

При использовании метода газовой силикатизации эффективность укрепления лессовых грунтов повышается. Увеличивается объем цементирующих новообразований за счет Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, образующегося в результате растворения карбонатов кальция под воздействием CO<sub>2</sub>. Предварительное нагнетание CO<sub>2</sub> в грунт и последующее введение инъекции раствора силиката натрия обеспечивают более полное его отверждение. Реакцию их взаимодействия можно представить в виде:



Образующийся цементирующий гель кремниевой кислоты Si(OH)<sub>4</sub> придает силикатированному грунту дополнительную прочность и водостойкость. Интенсификация процесса силикатизации, протекающая при воздействии CO<sub>2</sub>,

Таблица 2

Изменение свойств лессовых грунтов при закреплении разными методами силикатизации				
Показатели свойств	Методы закрепления лессовых грунтов			
	однорастворная силикатизация		газовая силикатизация	
	До	После	До	После
Плотность грунта ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup>	$\frac{1,62 \div 1,94}{1,70}$	$\frac{1,84 \div 2,14}{1,98}$	$\frac{1,68 \div 1,85}{1,74}$	$\frac{1,87 \div 2,13}{2,03}$
Плотность скелета грунта ( $\rho_d$ ), г/см <sup>3</sup>	$\frac{1,29 \div 1,66}{1,46}$	$\frac{1,63 \div 1,79}{1,75}$	$\frac{1,48 \div 1,70}{1,50}$	$\frac{1,68 \div 1,75}{1,72}$
Влажность ( $W$ ), %	$\frac{10,8 \div 16,9}{14,8}$	$\frac{12,6 \div 19,6}{13,9}$	$\frac{14,8 \div 17,9}{16,4}$	$\frac{17,8 \div 20,5}{18,7}$
Пористость ( $n$ ), %	$\frac{38,6 \div 52,0}{45,7}$	$\frac{33,0 \div 39,2}{35,3}$	$\frac{39,2 \div 47,4}{45,1}$	$\frac{34,5 \div 42,2}{37,0}$
Скорость продольных волн ( $V_p$ ), м/с	$\frac{500 \div 650}{560}$	$\frac{1100 \div 1200}{1140}$	$\frac{700 \div 1000}{870}$	$\frac{2200 \div 2500}{2360}$
Скорость поперечных волн ( $V_s$ ), м/с	$\frac{300 \div 350}{320}$	$\frac{550 \div 600}{570}$	$\frac{350 \div 400}{360}$	$\frac{1000 \div 1100}{1030}$
Отношение скоростей волн ( $V_p/V_s$ )	1,8÷2,0	1,6÷2,3	2,0÷2,5	2,2÷2,6
Сейсмическая жесткость ( $V_{si} \cdot \rho_1$ )	545	1130	625	2090
Приращение сейсмической балльности ( $\Delta I$ )	+0,18	-0,35	+0,08	-0,78

Таблица 3

Сравнительные данные об изменении приращения сейсмической интенсивности при уплотнении лессовых грунтов предварительным замачиванием и закреплении различными методами силикатизации			
Методы технической мелиорации	Оценка приращений сейсмической интенсивности на строительной площадке, баллы		
	До применения методов технической мелиорации (естественные условия)	После применения методов технической мелиорации (искусственный грунт)	Снижение приращений сейсмической интенсивности
Уплотнение грунтов методом предварительного замачивания	+0,50	+0,04	-0,46
Закрепление грунтов методом однорастворной силикатизации	+0,18	-0,35	-0,53 ≈ -1
Закрепление грунтов методом газовой силикатизации	+0,08	-0,78	-0,86 ≈ -1

обеспечивает увеличение объема закрепленного массива и повышение прочности грунта в 1,5–2 раза по сравнению с традиционной силикатизацией. Это обусловлено более полным отверждением силиката натрия углекислым газом.

Прочность грунта на одноосное сжатие, укрепленного газовой силикатизацией, составляла 1,8–2,4 МПа. Отсутствие в поровом растворе свободной щелочи приводит к снижению показателя рН раствора до 8,4–8,6. Тем самым создаются оптимальные условия для формирования водостойких форм кремниевой кислоты со степенью полимеризации 94–96%. В связи с этим скорость продольных и поперечных волн увеличивается в 2–3 раза по сравнению с исходным грунтом, а сейсмическая интенсивность снижается на 0,86 балла (табл. 2).

При оценке изменений  $\Delta I$  необходимо также учитывать изменение собственных частотных характеристик оснований под влиянием антипросадочных мероприятий, от которых существенно зависит интенсивность сейсмических колебаний в связи с возможностью возникновения резонансных эффектов [7].


Полученные данные об изменении приращения сейсмической интенсивности при уплотнении лессовых грунтов предварительным замачиванием и закреплении различными методами силикатизации представлены в табл. 3.

Необходимо отметить, что данные исследования проводились не только для установления преимуществ того или иного метода технической мелиорации лессовых оснований, но и для выявления тенденции изменения сейсмических свойств грунтов и количественной оценки приращения сейсмической интенсивности после применения этих методов.

### Заключение

В целях подготовки основания под строительство в сейсмически опасном регионе (Узбекистан) на лессовых просадочных грунтах в натуральных условиях проведены мероприятия по предупреждению или ликвидации просадочности. Использовано несколько методов технической мелиорации для их обработки, в том числе предва-

рительное замачивание и силикатизация. Проведенные исследования позволили достоверно установить преимущество использования метода газовой силикатизации с предварительной обработкой грунта углекислым газом. Эффективность данного метода прослеживается по всем показателям исследованных свойств лессовых грунтов по сравнению с методом предварительного замачивания. Отмечается существенное повышение плотности грунта ( $\rho_d = 1,73-1,75 \text{ г/см}^3$ ) и снижение его пористости (до 35–37%). Показатели сейсмической жесткости вдвое выше, чем у замоченного грунта, и значительно изменены показатели по оценке приращения сейсмической интенсивности. Увеличение численных характеристик физико-механических свойств укрепленных грунтов достигается на достаточно ранних сроках: уже на 3–5-е сутки после за-

крепления прочность достигает 70% от ее максимального значения. При использовании газовой силикатизации прочность в 1,5–2,0 раза выше по сравнению с одноразовой силикатизацией при равных концентрациях силиката натрия, и объем укрепленного грунта возрастает почти в два раза. Согласно полученным результатам замачивание необходимо проводить в течение 5–6 месяцев до строительства, поэтому метод применим только в летнее время на открытых незастроенных территориях со значительным расходом воды (на  $1 \text{ м}^3$  грунта —  $1 \text{ м}^3$  воды). Таким образом, эффективность применения метода газовой силикатизации для укрепления лессовых грунтов прослеживается по значительному изменению их физико-механических и сейсмических свойств в достаточно ранние сроки. 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артиков Т.У., Абдуллабеков К.Н., Ибрагимов Р.Н., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическое районирование Республики Узбекистан. Серия карт ОСР-2011. Ташкент: Издание Государственного научно-производственного предприятия «Картография», 2011. 4 листа в формате А-1.
2. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
3. Галай Б.Ф., Шаталов В.В. Сейсмические свойства структурно-неустойчивых грунтов Ставропольского края // Сборник научных трудов СевКавГУ. Серия «Естественнонаучная». 2008. № 4. С. 46–47.
4. Гольберг М.П., Исмаилов В.А., Хамраев Б. Некоторые закономерности изменений сейсмических свойств лессовых грунтов при их химическом закреплении // Техногенные факторы и проблемы прогноза сейсмического эффекта: тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. Ташкент: Фан, 1990. С. 80–81.
5. Касымов С.М. Инженерно-геологическая основа детального сейсмического районирования и микрорайонирования (на примере Узбекистана). Ташкент: Фан, 1979. 224 с.
6. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмолитозекологический подход). М.: ИНЖЭКО, 1994. 196 с.
7. Курдюк А.Ю. Влияние инженерной подготовки оснований на интенсивность сейсмических колебаний: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М.: НИИОСП, 1997. 23 с.
8. Мавлянов Г.А. О задачах инженерно-геологического изучения лессовых пород // Узбекский геологический журнал. 1970. № 4. С. 16–21.
9. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 284 с.
10. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию РСМ-73 // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 15: Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний. М.: Наука, 1973. С. 6–34.
11. Руководство по изучению глинистых грунтов при инженерных изысканиях для целей сейсмического микрорайонирования. М.: Стройиздат, 1984. 16 с.
12. Руководство по изучению сейсмических свойств лессовых грунтов при инженерных изысканиях для строительства в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1984. 12 с.
13. Соколов В.Е., Губкин В.А., Овчаренко А.Г. Новые способы закрепления лессовых грунтов. Днепропетровск: ПРОМІНЬ, 1975. 125 с.
14. Строительные нормы и правила «Строительство в сейсмических районах». КМК 2.02.01-96 «Основание зданий и сооружений». Издание официальное. Ташкент, 1998. 121 с.
15. Трофимов В.Т. Инженерная геология массивов лессовых пород: учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 398 с.

## Summary

The construction on loess soils is a complex problem in seismicity-prone areas. Taking into account the specific features of loess soils, to ensure the stability of structures, the bases are prepared using constructive measures and methods of artificial improvement of its physical and mechanical properties. The physical and physical-chemical methods of technical melioration are applied for prevention uneven and excessive sediments of loess soils increase their bearing capacity along with constructive methods. The method of ground improvement depends on the engineering and geological conditions of the


construction site, the uniqueness of the structures and financial investments.

The paper presents the results of studies on the use of soaking and silication methods for improving physical-mechanical properties of loess upon the construction in seismicity-prone areas. The complex approach to the study of engineering-geological and seismic properties of loess strata prior to the application of methods of technical melioration and after that, it is revealed that pre-soaking and silication of loess soils reduce seismic intensity and increase their seismic stability the construction site. The pre-soaking method for reducing of the subsidence

properties of loess was used in a construction pit in the Tashkent region where the thickness of the collapsibility layer was reached 23 m. The investigation established of influence of the soaking time of soils on their granulometric and total chemical composition and the duration of drying of soils on their physico-mechanical and seismic properties. The decrease of seismic intensity by 0.65 points was observed with a drying time of loess thickness during 21 months of observation.

One of the effective ways of the ground improvement is a chemical fixing, in particular, silicification of loess soils. The investigation of the impact of various modifications of the silicification method on the changes in the physico-mechanical and seismic properties of loess soils have been carried out at two construction sites in Tashkent. The one-

solution silication method was applied for decrease of the subsidence properties of soils with low values of the moisture index and gas silicization for soils with a high humidity. The available research results of in-situ and laboratory studies show the advantage of using gas silicization with preliminary treatment of the soil with carbon dioxide in comparison with other methods. The gas silicization of the loess strata is decrease the seismic intensity by more than 0.9 points, when single-solution silicization by 0.63 points.

The authors have proved experimentally the certain advantages of the discussed methods and their applicability to improving ground conditions for the construction of new or reinforcing of existing buildings in seismicity-prone areas. 

## CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. The scheme of loess compaction by soaking in the foundation pit: 1 — contours of the pit before soaking; 2 — contours of the pit after soaking; 3 — lateral subsidence cracks; 4 — compacted soil; 5 — buried soil horizon; 6 — conventional depth of artificial moistening of ground; 7 — natural soil; C — bore hole, III — pit

Fig. 2. The scheme of consolidation of loess bases by silication: 1 — bore hole, 2 — injector, 3 — anchored primer, 4 — loess soils in the natural state; W — test pits

Fig. 3. The change of the seismic intensities of the loess foundation during prolonged pre-soaking

## CAPTIONS TO TABLES

Table 1. Results of changes of soil properties during pre-soaking

Table 2. The changes of loess properties upon its reinforcing by different silication methods

Table 3. Comparative data on the changes in seismic intensity of loess upon its compaction by pre-soaking and reinforcing by various methods of silication

## REFERENCES

1. *Artikov T.U., Abdullabekov K.N., Ibragimov R.N., Ibragimov R.S., Ziyaudinov F.F.* Sejsmicheskoe rajonirovanie Respubliki Uzbekistan. Seriya kart OSR-2011 [Seismic Zonation of Uzbekistan Republic Territory. The Series of Maps OSR-2011]. Tashkent, Izdanie Gosudarstvennogo nauchno-proizvodstvennogo predpriyatiya «Kartografiya» [Publication of State scientific-production enterprise «Cartography»], 2011. 4 lista v formate A-1 [4 sheets of A-1 format]. (Rus.).
2. *Voronkevich S.D.* Osnovy tehnicheckoj melioracii gruntov [Basis of Technical Soil Reclamation]. M.: Nauchnyj mir [Scientific World], 2005. 504 s. (Rus.).
3. *Galaj B.F., Shatalov V.V.* Sejsmicheskie svojstva strukturno-neustojchivykh gruntov Stavropol'skogo kraja [Seismic Properties of Structurally Unstable Soils of The Stavropol Krai] // Sbornik nauchnykh trudov SevKavGU. Seriya «Estestvennonauchnaya» [Proceed. of Scientific Publication of The North-Caucasus Federal University. Series Natural Science]. 2008. № 4. S. 46–47. (Rus.).
4. *Gol'berg M.P., Ismailov V.A., Hamraev B.* Nekotorye zakonomernosti izmenenij sejsmicheskikh svojstv lessovykh gruntov pri ih himicheskom zakreplenii [Certain Regularities of Changes in the Seismic Properties of Soils During Their Chemical Fixation] // Tehnogennye faktory i problemy prognoza sejsmicheskogo jeffekta: tezisy dokladov Vsesoyuznoj nauchnoj konferencii [Proceed. «Human Induced Factors and Problems of Seismic Effect Forecasting»]. Tashkent: Fan, 1990. S. 80–81. (Rus.).
5. *Kasymov S.M.* Inzhenerno-geologicheskaya osnova detal'nogo sejsmicheskogo rajonirovaniya i mikrorajonirovaniya (na primere Uzbekistana) [Engineering Geology Basis of Detailed and Micro Seismic Zoning (A Case Study of Uzbekistan)]. Tashkent: Fan, 1979. 224 s. (Rus.).
6. *Kruger N.I., Kozhevnikov A.D., Mindel' I.G.* Sejsmicheskie svojstva dispersnykh porod (sejsmolitologicheskij podhod) [Seismic Properties of Dispersed Rocks (Seismolithological Approach)]. M.: INJECO, 1994. 196 s. (Rus.).
7. *Kurdyuk A.Yu.* Vliyanie inzhenernoj podgotovki osnovanij na intensivnost' sejsmicheskikh kolebanij: avtoref. dis. ... kand. teh. nauk [The Influence of Engineering Preparation of the Structure Foundations on the Intensity of Seismic Fluctuations: Abstract of the Dissertation of Candidate of Technical Science]. M.: NIIOSP, 1997. 23 s. (Rus.).
8. *Mavlyanov G.A.* O zadachah inzhenerno-geologicheskogo izucheniya lessovykh porod [About Tasks of Engineering Geology Studies of Loess Soil] // Uzbekskij geologicheskij zhurnal [Uzbek Geological Journal]. 1970. № 4. S. 16–21. (Rus.).
9. *Medvedev S.V.* Inzhenernaya sejsmologiya [Engineering Seismology]. M.: Gosstrojizdat, 1962. 284 s. (Rus.).



10. Rekomendacii po sejsmicheskomu mikrorajonirovaniyu RSM-73 [Recommendation for Seismic Microzonation, RSM-73] // Voprosy inzhenernoj sejsmologii [Questions of Engineering Seismology]. Vyp. 15: Vliyanie gruntov na intensivnost' sejsmicheskikh kolebanij [Vol. 15: Influence of Soils on The Intensity of Seismic Oscillations]. M.: Nauka [science], 1973. S. 6–34. (Rus.).
11. Rukovodstvo po izucheniyu glinistyh gruntov pri inzhenernyh izyskaniyah dlya celej sejsmicheskogo mikrorajonirovaniya [A Guide for Studying Clay Soils in Engineering Surveys for Seismic Microzoning Purposes]. M.: Strojizdat, 1984. 16 s. (Rus.).
12. Rukovodstvo po izucheniyu sejsmicheskikh svoystv lessovyh gruntov pri inzhenernyh izyskaniyah dlya stroitel'stva v sejsmicheskikh rajonah [A Guide for Studying the Seismic Properties of Loess Soils in Engineering Surveys for Construction in Seismic Regions]. M.: Strojizdat, 1984. 12 s. (Rus.).
13. Sokolovich V.E., Gubkin V.A., Ovcharenko A.G. Novye sposoby zakrepleniya lessovyh gruntov [New Ways of Loess Soils Fixing]. Dnepropetrovsk: PROMIN', 1975. 125 s. (Rus.).
14. Stroitel'nye normy i pravila «Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah» KMK 2.02.01-96 «Osnovanie zdaniy i sooruzhenij» [Building Norms and Rules «Construction in Seismic Regions» KMK 2.02.01-96 «Foundation of Buildings and Structures»]. Izdanie oficial'noe [Official Edition]. Tashkent, 1998. 121 s. (Rus.).
15. Trofimov V.T. Inzhenernaya geologiya massivov lessovyh porod: uchebnoe posobie [Engineering Geology of Loess Rock Massifs: a Textbook]. M.: KDU, 2007. 398 s. (Rus.).

## ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ»,

«ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,

«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)

# 2017

## ПЕРЕЧЕНЬ КОНФЕРЕНЦИЙ ЖУРНАЛА «ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ» в 2017 году

Тел.: +7 (495) 210-63-90, 210-89-92, Москва, Электrozаводская улица, д. 60, conf@geomark.ru



Саморегулируемая организация



Ассоциация  
«Инженерные изыскания  
в строительстве»



13–14 февраля 2017 года

Вторая научно-практическая конференция  
«ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ: НОРМАТИВНАЯ БАЗА,  
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

13–14 апреля 2017 года

Научно-практическая конференция  
«ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОСТИ  
И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ»

21–22 сентября 2017 года

Первая научно-практическая конференция  
«ИЗУЧЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ»

19–20 октября 2017 года

Вторая общероссийская научно-практическая конференция  
«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ»

28 ноября–1 декабря 2017 года

Тринадцатая общероссийская конференция и выставка  
с международным участием  
«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)