

РАЗЖИЖЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

LIQUEFACTION OF CLAYEY SOILS

© 2024 г. Е. А. Сенцова¹, М. С. Никитин², Е. А. Вознесенский³© 2024 E. A. Sentsova¹, M. S. Nikitin², E. A. Voznesensky³

^{1,2} Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119234, Россия
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

³ Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000, Россия
Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, 13 bld 2 Ulansky lane, Moscow, 101000, Russia

sentsovaea@gmail.com¹, mikes.nikitin@gmail.com², eugene@geoenv.ru³

Аннотация. В статье собраны и проанализированы современные взгляды о разжижении глинистых грунтов. Показано, что глинистые грунты, также как и песчаные, могут переходить в разжиженное состояние при воздействии динамических нагрузок. Описаны механизмы разжижения водонасыщенных чувствительных глин, слабосвязных грунтов и лессов. Обсуждаются результаты лабораторных экспериментов по определению динамической разжижаемости глинистых разностей. Отмечено, что генезис и постгенетические процессы обуславливают квазитиксотропный и дилатантно-тиксотропный механизмы разжижения глинистых грунтов как многокомпонентных динамических систем.

Abstract. The article collects and analyzes modern views on the liquefaction of clay soils. It is demonstrated that clay soils can also liquefy very much like sands when exposed to dynamic loads. The mechanisms of liquefaction for saturated sensitive clays, cohesionless soils, and loesses are described. Finally, the results of laboratory experiments to determine the possibility of dynamic liquefaction in clay soils are discussed. It is noted that the quasi-thixotropic and dilatant-thixotropic mechanisms of clayey soils liquefaction, as multicomponent dynamic systems, are determined by genesis and postgenetic processes.

Ключевые слова: сейсмичность, динамическая неустойчивость, разжижение, глинистый грунт, чувствительная глина, шламы, лессы.

Keywords: seismicity, dynamic instability, liquefaction, clay soil, sensitive clay, quick clay, mine tailings, loess.

Введение

Землетрясения являются одним из наиболее мощных и распространенных источников природных динамических нагрузок. Ежегодно с помощью станций глобальной сейсмологической сети GSN в мире регистрируется десятки тысяч землетрясений, из которых более ста происходят с магнитудой выше 6.

Для территории России в целом характерна весьма высокая изменчивость сейсмических условий (рис. 1). В Европейской части высокой сейсмичностью отличаются Большой Кавказ и Предкавказье, а также Крымский полуостров; в Сибири — Алтай, Саяны, Байкал и Забайкалье, на Дальнем Востоке — районы Приамурья, Курильские острова, полуостров Камчатка, прибрежная часть Корякского нагорья, остров Сахалин. Менее активны полуостров Чукотка, Верхояно-Колымский регион, Арктическая область, Приморье, но и здесь

возникают достаточно сильные землетрясения. Платформенные территории находятся в зоне умеренной сейсмичности, тем не менее периодически и там происходят существенные сейсмические события. Так, например, в 2019 году на западе Челябинской области была зафиксирована целая серия землетрясений с магнитудой до 4,5.

Повышенная сейсмичность территории безусловно осложняет проектирование и строительство инженерных сооружений. Поэтому особое внимание следует уделять изучению реакции грунтов на динамические воздействия, которая может проявляться в снижении жесткости, повышении деформируемости, изменении прочности вплоть до разжижения. Последний вариант часто приводит к катастрофическим последствиям. Под разжижением понимается переход грунта в текучее состояние вне зависимости от причины такой трансформации и величины

последующих деформаций: это может быть действие как статической, так и динамической нагрузки, а также подъем уровня грунтовых вод или возникновение значительных градиентов напора. Динамическое разжижение — это переход водонасыщенных дисперсных грунтов в текучее состояние в результате разрушения структурных связей под действием сейсмических волн [1].

К разжижению склонны водонасыщенные рыхлые мелкие пески и пески средней крупности, крупные и гравелистые разности при определенном стечении обстоятельств, а также некоторые связные и слабосвязные грунты. В рамках данной работы внимание акцентировано на вопросах разжижения глинистых грунтов, актуальных и имеющих большое практическое значение.

Первые работы, посвященные этой тематике, появились в начале прошлого столетия. В 1908 году, до становления динамики грунтов как научного направления, шведский химик Альберт Мауритз Аттерберг опубликовал в немецком агрономическом журнале свои представления о причинах жидкообразного поведения пласта водонасыщенных глин при строительстве железной дороги на севере Швеции [20, 21]. Разработанный А. М. Аттербергом и широко применимый в зарубежной практике метод определения предела текучести глинистых

грунтов с помощью чаши Казагранде является наглядным примером демонстрации их перехода в текучее состояние при приложении динамической нагрузки.

Начиная с 30-х годов XX века с активным развитием динамики грунтов ученые всего мира начали освещать проблему разжижения глинистых грунтов. Этим вопросом занимались Терцаги К. и Пек Р. [13], Герсеванов Н. М. [4], Горькова И. М. [5, 6], Бьеррум Л. [22, 23], Розенквист И. Т. [16, 30], Пуш Р. [29], Тер-Степанян Г. И. [19], Денисов Н. Я. [8, 9], Танкаева Л. К. [18], Вознесенский Е. А. [1–3, 15], Зеркаль О. В. [3, 10], Кутергин В. Н. [12], Ишихара К. [25], Осипов В. И. [14, 28], Ванг Дж. [31].

Механизмы разжижения глинистых грунтов

Механизмы разжижения глинистых грунтов как многокомпонентных дисперсных систем весьма однозначно и изящно объясняются через понимание особенностей их генезиса и дальнейших постгенетических процессов.

«Плывунные» глины

Плывунные глины (quick clays) встречаются среди молодых морских после- и позднеледниковых отложений, распространенных на побережьях скандинавских стран, Канады, Аляски (рис. 2) и отдель-

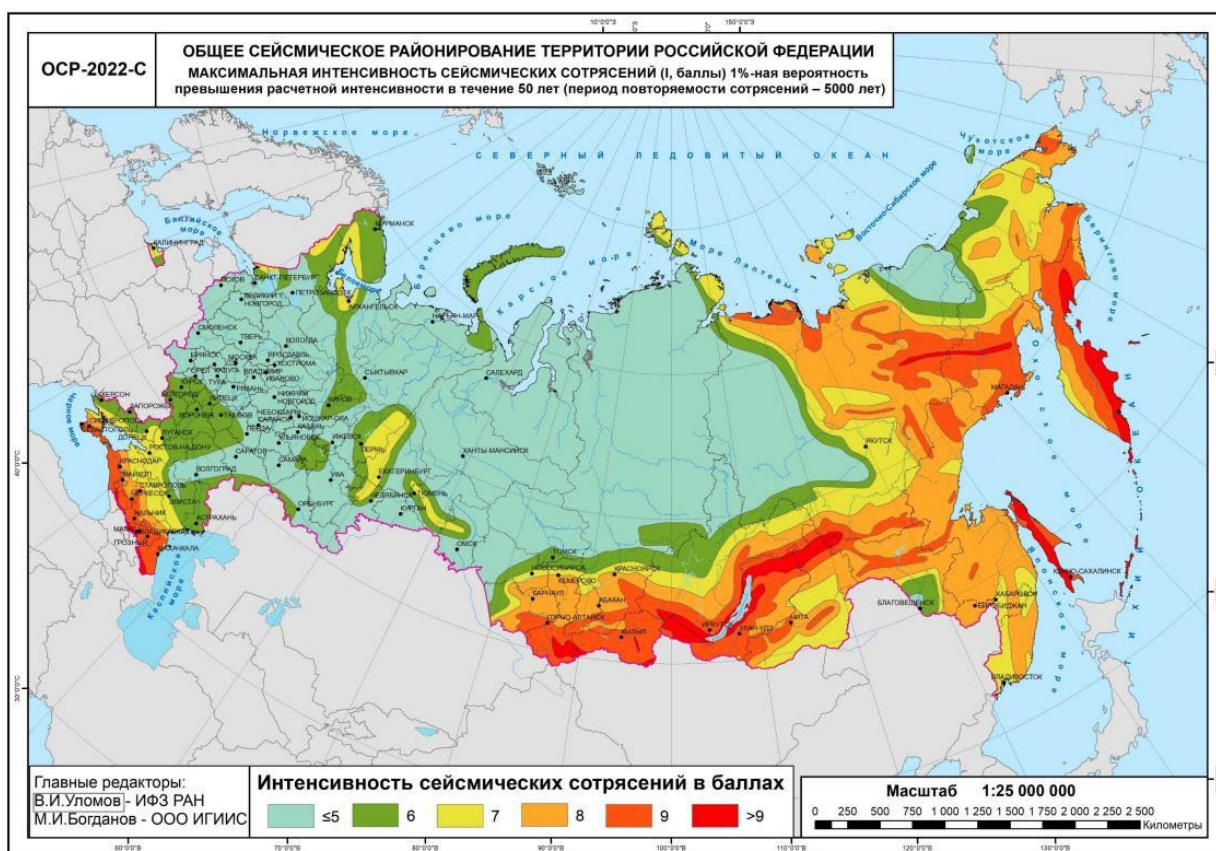


Рис. 1. Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-2022-С [17]

ных районов севера Европейской части России, где с ними связано развитие «быстрых» оползней течения.

В ненарушенном сложении плывунные глины обладают достаточным структурным сцеплением и имеют прочность на сдвиг, измеряемую десятками долями МПа. Однако при нарушении природного сложения под влиянием динамических воздействий или простого механического перемятия их прочность резко падает — глины превращаются в вязкую жидкость, способную растекаться под углом 2–4°.

Такие необычные свойства напрямую связаны со специфическими условиями образования этих грунтов и их последующими физико-химическими преобразованиями на стадии эпигенеза [14, 29, 30].

Формирование этих особо чувствительных грунтов происходило на морском шельфе, куда с пресными талыми водами поступал обломочный материал раздробленных ледником горных пород. При осаднении осадка в морской воде с повышенной концентрацией солей происходило поджатие диффузных слоев глинистых минералов и уменьшение толщины гидратных пленок и быстрая флокуляция частиц, что позволило сформироваться ближним коагуляционным контактам типа базис-скол, скол-скол (рис. 3) внутри агрегатов и связующих их цепочек. Таким образом образовалась коагуляционная

агрегированная микроструктура ячеистого типа, не обладающая высокими показателями прочности (рис. 4, 5) по причине небольшой суммарной поверхности контактов между частицами.

При последующем воздымании территории рассматриваемые глинистые грунты оказались вблизи дневной поверхности. За счет инфильтрации пресных атмосферных осадков концентрация солей порового раствора в грунтах упала, произошло утолщение гидратных оболочек, и ближние коагуляционные контакты перешли в более устойчивые дальние (рис. 3). Сформировалась метастабильная структура, при малейшем нарушении которой грунт начинает течь.

Способность к разжижению плывунных глин была продемонстрирована Е. А. Вознесенским в лабораторных условиях. Объектом исследования стали «особо плывунные» глины из толщи «Tiller», отобранные в юго-восточной части г. Тронхейма (Норвегия). Она имеет характерное для чувствительных глин микростроение — на фоне высокой общей пористости (более 50%) наблюдается много контактов типа «базис-скол», глинистые мостики очень тонкие и малочисленные. На образцах ненарушенного строения была проведена серия динамических трехосных испытаний, типичные результаты отдельного эксперимента приведены на рисунке 6.

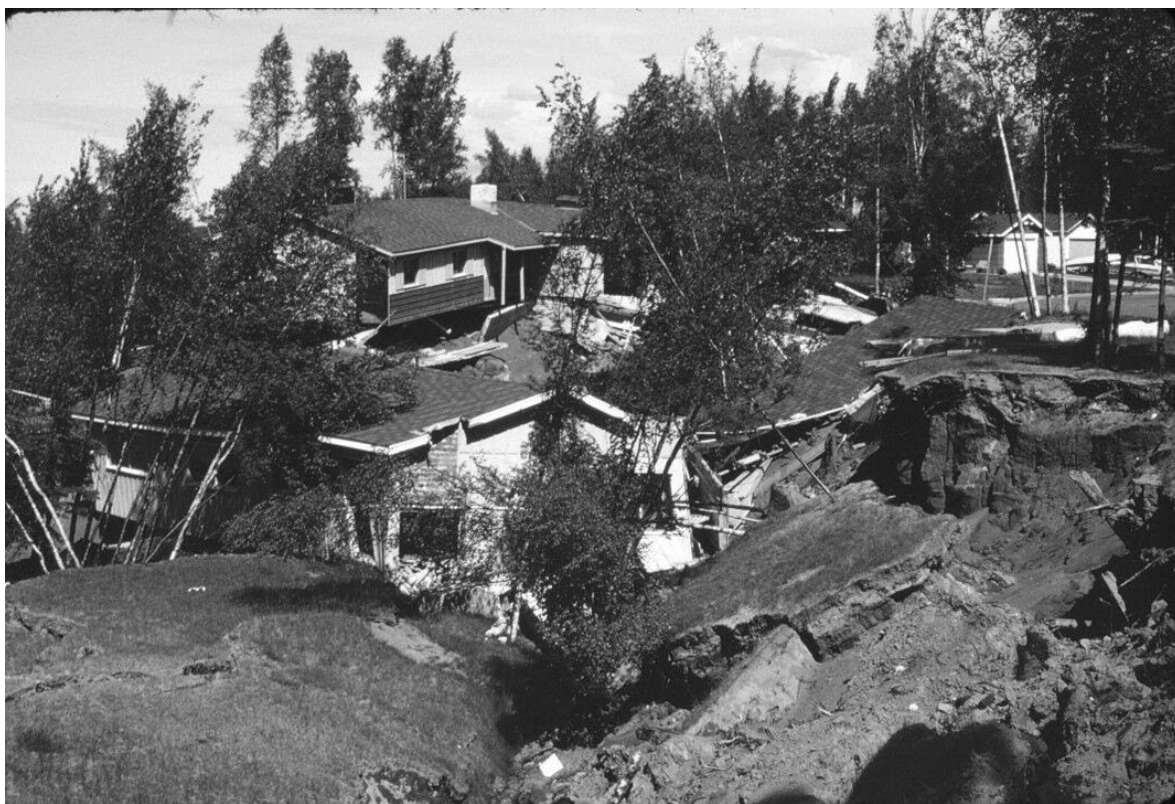


Рис. 2. Результат схождения оползня в плывунных глинах, спровоцированного землетрясением магнитудой 8,4, Анкоридж, Аляска, 1964 (Фото Урбена Ж. Кине)

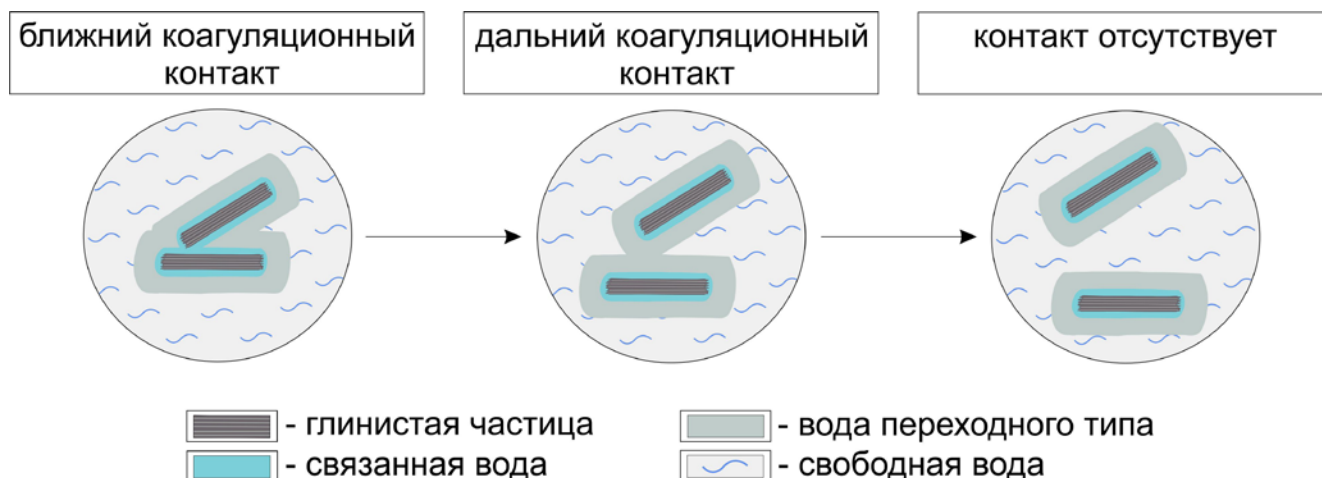


Рис. 3. Преобразование геометрического типа контактов чувствительной глины

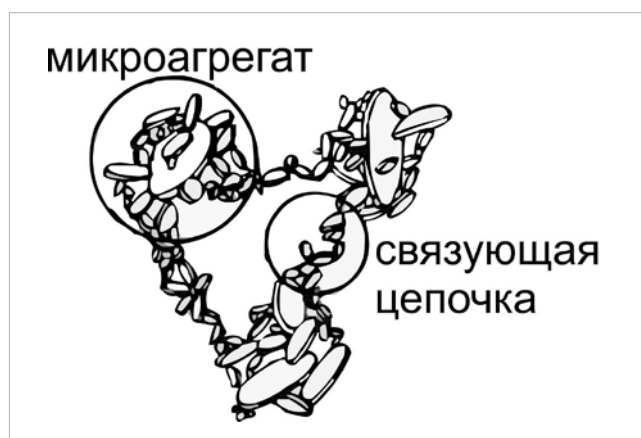


Рис. 4. Связи микроагрегатов плавунных глин между собой [29]

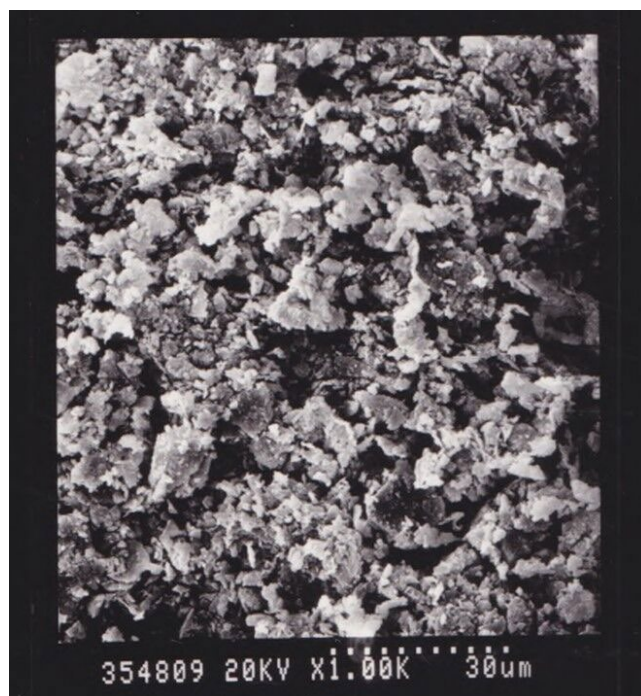


Рис. 5. РЭМ-изображение чувствительной глины. Коагуляционная агрегированная микроструктура ячеистого типа [1]

Разжижение происходило в центре или нижней трети образца после достижения осевой деформации 5% (рис.7). На диаграммах это выражается скачкообразным увеличением осевой деформации в конце опыта. При этом измеряемое по торцам образца в недренированных испытаниях связных грунтов поровое давление не соответствует реально существующему в центральной части. Такой эффект связан прежде всего с тем, что при характерных для циклических испытаний высоких скоростях деформирования поровое давление не успевает выравниваться во всем объеме грунта из-за его низкой проницаемости.

Характерным механизмом динамической неустойчивости плавунных глин является тиксотропия, которая выражается в полном или частичном разрушении структурных связей грунта при неизменных объеме и влажности под действием динамической нагрузки, после чего в состоянии покоя происходит их самопроизвольное восстановление. И это восстановление развивается в них очень быстро: уже через несколько минут после разжижения образца в эксперименте его можно без особых предосторожностей вынуть из стабилометра и снять мембрану (рис. 7).

Слабосвязные грунты

В природе существует достаточно обширная группа грунтов, промежуточная по многим свойствам между нев связными, проявляющими динамическую дилатансию, и связными — квазитиксотропными грунтами. По гранулометрическому составу грунты данной группы отвечают диапазону от пылеватых песков и супесей до легких суглинков (в том числе и мягкопластичные субаквальные отложения — илы [26], золы уноса и гидроудаления [2], шламы [24]).

Слабосвязные грунты имеют характерные особенности реакции при приложении динамических

нагрузок: во-первых, они склонны к резкой потере прочности даже при нагрузках незначительной интенсивности, во-вторых, им свойственно постепенное и очень медленное увеличение прочности после прекращения динамического воздействия. Механизм разжижения в значительной мере определяется особенностями их микростроения.

Слабосвязные грунты в основном обладают скелетной (зернистой) микроструктурой (рис. 8). Она сложена преимущественно зернами первичных силикатов, формирующих однородный минеральный «скелет». Глинистый материал распределен неравномерно и не создает сплошной матрицы: обычно он скапливается на поверхности зерен в виде рубашек или на контактах песчаных и пылеватых зерен, образуя между ними своеобразные глинистые связки («глинистые мостики») с контактами коагуляционного типа между глинистыми частицами [27]. Резкая потеря прочности таких грунтов при динамическом воздействии выражается в быстром разжижении их водонасыщенных разностей. За счет скелетной микроструктуры в грунтах кулоновское трение меньше, чем в чистом песке, а коагуляционная сетка чрезвычайно слабая и довольно часто прерывистая. Относительно низкая проницаемость затрудняет диссипацию порового давления и облегчает быстрое разжижение грунта.

Слабосвязные грунты с ячеистым микростроением, например, глинистые и суглинистые илы, имеют высокую пористость и влажность, которые обуславливают их динамическую неустойчивость.

Изучение слабосвязных грунтов при динамическом воздействии требует пристального внимания, отсутствие которого приводит к катастрофическим последствиям. Так, например, 5 ноября 2015 года в районе города Мариана в бразильском штате Минас-Жерайс произошла серия сейсмических толчков, спровоцировавших разжижение шламов, прорвавших дамбы на каскаде из двух хвостохранилищ горнопромышленного комплекса. Масштабная трагедия связана с резким увеличением объемов добычи железной руды и недоучетом при проектировании и эксплуатации хвостохранилища динамических свойств грунтов.

В лабораторных условиях при динамических испытаниях можно отчетливо зафиксировать разжижение слабосвязных грунтов. На рисунке 9 приведены результаты динамического трехосного опыта на модельном образце с заданной влажностью и плотностью суглинка легкого пылеватого мягкопластичного ($\rho=2,24$ г/см³, $W=16,5\%$). В ходе эксперимента был зафиксирован факт разжижения образца по достижению величины приведен-

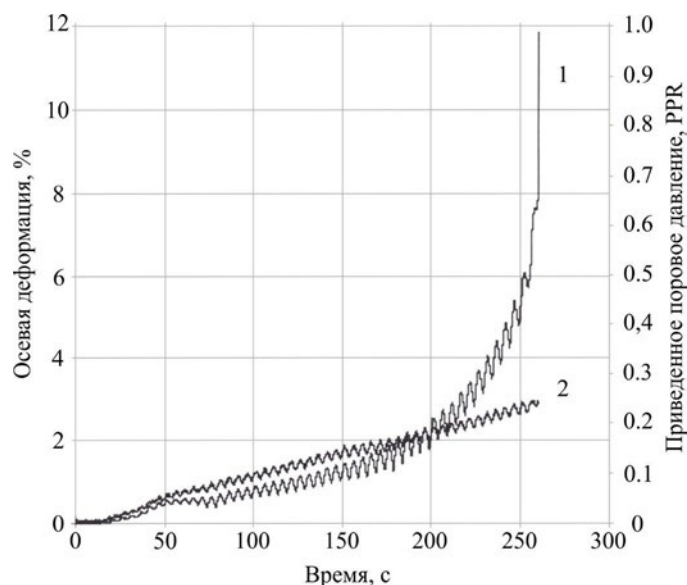


Рис. 6. Результаты динамического трехосного испытания пылевунной глины из толщи «Tiller» (1 — осевая деформация, 2 — приведенное поровое давление) [1]



Рис. 7. Фото образца глины из толщи «Tiller» после разжижения в динамическом трехосном испытании [1]

ного порового давления $PPR \geq 95$ при деформации более 5% (рис. 9). Разжижение происходило в нижней части образца (рис. 10).

Механизм проявления динамической неустойчивости слабосвязных грунтов можно описать как дилатантно-тиксотропный. Во-первых, при динамических воздействиях часто происходит их дополнительное уплотнение, которое может продолжаться, в том числе, после снятия сейсмической нагрузки. Во-вторых, слабосвязные грунты разупрочняются при динамическом воздействии с последующим восстановлением прочности в состоянии покоя и в недренированных условиях, что связано с проявлением их тиксотропных свойств [1].



Рис. 8. Зернистая (скелетная) микроструктура модельного песчаного образца с добавлением бентонита: (а) — увеличение $\times 300$, (б) — увеличение $\times 1000$ [27]

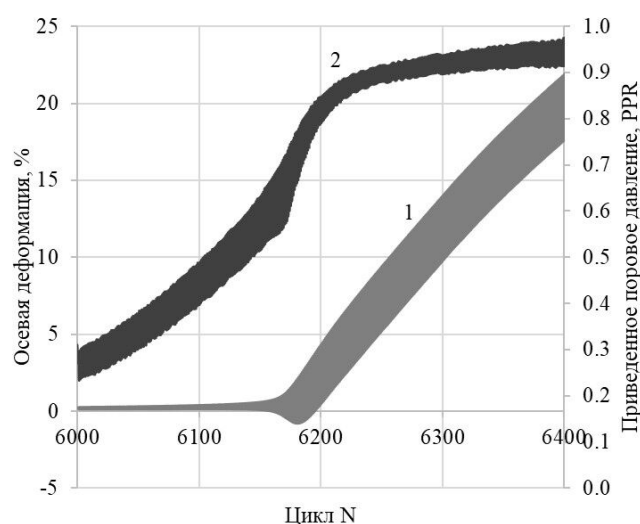


Рис. 9. Результаты динамического трехосного испытания суглинка легкого пылеватого мягкопластичного (1 — осевая деформация, 2 — приведенное поровое давление)

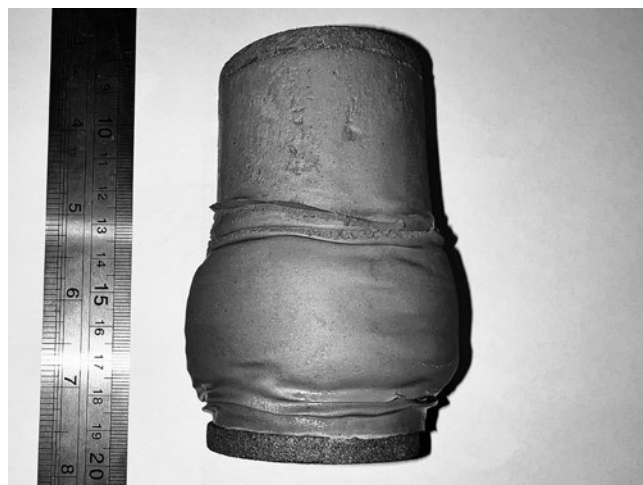


Рис. 10. Фото образца суглинка легкого пылеватого мягкопластичного после динамического трехосного испытания, разжиженной в нижней трети образца

Водонасыщенные лессовые грунты

Лессовые грунты представлены континентальными породами различного происхождения, содержащими более 50% частиц размером 0,05–0,005 мм и обладающими высокой пористостью и макропорами. В целом, это песчано-глинисто-пылеватые грунты.

По форме проявления динамической неустойчивости их можно отнести к слабосвязным грунтам. Очень часто, имея скелетную микроструктуру, водонасыщенные лессовые грунты демонстрируют чрезвычайно резкое скачкообразное падение прочности при увеличении их влажности всего на 1–3% вблизи некоторого критического ее значения, обычно близкого к пределу текучести [10]. Феноменологически это выражается как динамическое разжижение при длительно сохраняющемся поровом давлении и приводит, в частности, к катастрофическим сейсмогенным оползням течения [1, 3, 24, 30, 31].

Механизм динамической неустойчивости увлажненных лессовых грунтов также связан с дилатантно-тихсотропными явлениями. Характерная для лессовых грунтов сеймопросадка происходит с частичным восстановлением прочности. При этом, стоит отметить, что в связи с необратимым динамическим разрушением контактов переходного и, отчасти, цементационного типов, несмотря на положительную динамическую дилатансию, полного восстановления прочности лессового грунта не достигается. Процесс восстановления, как правило, завершается в течение 2 суток, и конечная прочность может составлять до 85–95% ее исходной величины [3].

Выводы

1. Глинистые грунты также как и песчаные могут переходить в разжиженное состояние при воздей-

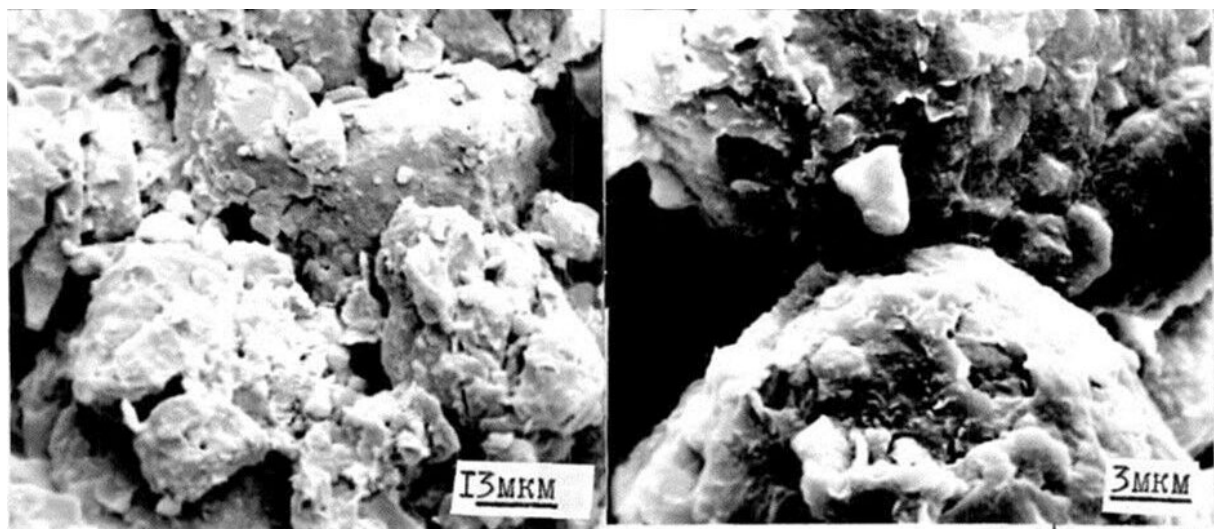


Рис. 11. Характер контактов между глобулярными микроагрегатами тяжелого лессовидного суглинка со скелетным типом микроструктуры [11]

ствии динамических нагрузок. Наиболее подвержены разжижению увлажненные и водонасыщенные чувствительные глины, слабосвязные грунты и лессы. В связи с этим в сейсмически активных районах следует оценивать возможность разжижения при ожидаемых землетрясениях не только водонасыщенных песков, но и достаточно широко распространенных пылеватых слабосвязных разностей, а также геологически молодых глин текучей и скрытотекучей консистенции.

2. Квазитиксотропный и дилатантно-тиксотропный механизмы разжижения глинистых грунтов, как многокомпонентных динамических систем

обусловлены особенностями их генезиса и дальнейших постгенетических процессов.

3. Во многих случаях динамически чувствительные разжижаемые грунты оказываются техногенного происхождения, по своим свойствам они очень близки к плывунам. При оценке сейсмической устойчивости шламов, зол уноса также необходимо учитывать их потенциальную способность к разжижению.

Работа выполнена на оборудовании, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов: дис. ... докт. геол.-мин. наук. — М., 2000. — 368 с.
2. Вознесенский Е. А., Бердина Э. С. Поведение зол гидроудаления при динамическом воздействии // Геоэкология. — 1996. — №1. — С. 62–78.
3. Вознесенский Е. А., Зеркаль О. В. Реакция лесовых грунтов на динамические воздействия при землетрясениях // Проблемы сейсмологии и инженерной геологии: Материалы международной конференции, посвящ. 85-летию акад. Г. А. Мавлянова. — Ташкент: ГПИ Узбекгидрогеология, 1995. — С. 52–58.
4. Герсевич Н. М. Основы динамики грунтовой массы. — Ленинград: ОНТИ. Глав. ред. строит. литературы, 1937. — 242 с.
5. Горькова И. М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. — М.: Стройиздат, 1975. — 151 с.
6. Горькова И. М. Физико-химическая механика дисперсных грунтов как основа инженерно-геологического прогнозирования // Инженерная геология. — 1980. — С. 61–66.
7. ГОСТ 56353–2020 «Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов»
8. Денисов Н. Я. О природе высокой чувствительности плывунных глин // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1963. — № 5. — С. 5–8.
9. Денисов Н. Я. Поровое давление и прочность недоуплотненных глинистых грунтов // Докл. на VI Междунар. конгр. по механике грунтов и фундаментостроению. — 1965. — С. 7–15.
10. Зеркаль О. В. Сейсмогенные оползни Гиссарского землетрясения 1989 г., факторы их формирования и развития: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М., 1994. — 21 с.

11. Коломийцев Н. В. Условия формирования ательских пород Прикаспийской впадины и их инженерно-геологические особенности: дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М., 1985. — 231 с.
12. Кутергин В. Н. Закономерности изменения свойств глинистых грунтов при вибрации. — М.: Наука, 1989. — 143 с.
13. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Б. Пек / пер. с англ. А. В. Сулима-Самуйло / под ред. проф. М. Н. Гольдштейна. — М.: Госстройиздат, 1958. — 607 с.
14. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. — М.: ГЕОС, 2013. — 576 с.
15. Разжижение грунтов при циклических нагрузках / Е. А. Вознесенский, В. Г. Коваленко, Е. С. Кушнарева, В. В. Фуникова. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 134 с.
16. Розенквист И. Т. Оползни плавунных глин // Наука и жизнь. — 1973. — №5. — С. 119–122.
17. СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий» (проект, Изменение № 1)
18. Танкаева Л. К. Природа структурных связей и плавунность лессового бассейна нижнего течения р. Вахш: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М., 1964. — 19 с.
19. Тер-Степанян Г. И. Геотехнические исследования иольдиевых структурных глин // Труды НИС Ленинградского отделения Треста глубинных работ, 1941. — Вып. 2. — С. 4–20.
20. Atterberg A. M. Studien auf dem Gebiet der Bodenkunde // Die Landwirtschaftlichen Versuchsstationen. — 1908. — Vol. 69. — P. 93–143.
21. Atterberg A. M. Die Eigenschaften der Bodenkörner und die Plastizität der Böden // Kolloidchemische Beihefte. — 1914. — № 6 (2–3). — P. 55–89.
22. Bjerrum L., Arvid L. Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay // Geotechnique. — 1966. — № 16. Geotechnique. — P. 1–20.
23. Bjerrum L., Rosenquist I. Some experiments with artificially sedimented clays // Geotechnique. — 1956. — № 3. — P. 124–136.
24. Dillon M. J., Wardlaw H. J. Strength and liquefaction assessment of tailings // Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste. — Perth: Australian Centre for Geomechanics. — 2010. — P. 347–360. doi.org/10.36487/ACG_rep/1008_30_Dillon.
25. Ishihara, K., Okusa S., Oyagi N., Ischuk A. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Soviet Tajik // Soil and foundation. — Vol. 30. — №4. — P. 431–448.
26. Giles D. P., Griffiths J. S. Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation // Engineering Group Working Party Report. Geological Society. — London: Engineering Geology Special Publications. — 2020. — № 29. — P. 205–221. doi.org/10.1144/EGSP29.7
27. Houston W. N., Herrmann H.G. Undrained cyclic strength of marine soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 1980. — №106. — P. 691–712.
28. Hutchinson J.N. Engineering in relict periglacial and extraglacial areas in Britain // Applications of Quaternary Research, Quaternary Proceedings. Cambridge: Quaternary Research Association. — 1992. — № 2. — P. 49–65.
29. Osipov, V.I., Gratchev, I.B., Sassa, K. The Mechanism of Liquefaction of Clayey Soils // Landslides. Berlin, Heidelberg: Springer. — 2005. P. 74–89. doi.org/10.1007/3-540-28680-2_15 ()
30. Pusch, R. Clay microstructure. A study of the microstructure of soft clays with special reference to their physical properties. — Stockholm: National Swedish Institute for building research. — 1970. — P. 78.
31. Rosenqvist, I. T. Considerations on the Sensitivity of Norwegian Quick Clay // Geotechnique. — 1953. — № 3(5). — P. 195–200. doi:10.1680/geot.1953.3.5.195
32. Wang, J., L. Wang, P. Wang, Q. Wang, and M. Wei. A study of liquefaction characteristics of saturated loess in different regions [In Chinese] // Hydrogeol. Eng. Geol. — 2011. — № 38(5). — P. 54–57.
33. Yang, Z., C. Zhao, L. Wang, and W. Rao. “Liquefaction behaviors and steady state strength of saturated loess.” [In Chinese.] // Chin. J. Rock Mech. Eng. — 2004. — № 23 (22). P. 3853–3860.