

УДК 624.131.4

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ПОРОВЫХ ВОД НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ (ГЛИНИСТЫХ) ГРУНТОВ МЕТОДОМ СМЕШИВАНИЯ С ЦЕОЛИТАМИ

© 2022 г. А. А. Кудяев<sup>1,\*</sup>, Ф. С. Карпенко<sup>2,\*\*</sup>, Д. В. Корост<sup>1,\*\*\*</sup>, О. Н. Видищева<sup>1,\*\*\*\*</sup>, М. М. Кучуков<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119234 Россия

<sup>2</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: a.a.kudaev@gmail.com

\*\*E-mail: kafs08@bk.ru

\*\*\*E-mail: dkorost@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: vid6877@yandex.ru

\*\*\*\*\*E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 01.08.2022 г.

В работе рассмотрен метод пробоподготовки искусственных образцов (пасты) дисперсных глинистых отложений с заданной газонасыщенностью, заключающийся в их смешивании с цеолитом, насыщенным газом. Моделирование газонасыщенности образцов донных отложений, отобранных в районе развития субаквального оползня Красноярский на оз. Байкал, позволило оценить вклад газовой составляющей в изменение их прочностных характеристик. Установлена обратная зависимость между концентрацией свободного “пузырькового” газа в придонных отложениях акватории оз. Байкал и их прочностными характеристиками и структурой пустотного пространства. Предложенный метод позволяет моделировать газонасыщенность изучаемых образцов дисперсных глинистых грунтов с целью изучения изменений их физико-механических свойств и может использоваться при проведении геологоразведочных работ на углеводородное сырье в условиях шельфа, а также при инженерно-геологических изысканиях для оценки несущей способности грунтов при изменении газонасыщенности донных отложений.

**Ключевые слова:** газонасыщенные грунты, субаквальные грунты, цеолиты, моделирование газонасыщенности, устойчивость склонов, субаквальные оползни, компьютерная томография

DOI: 10.31857/S0869780922050058

### ВВЕДЕНИЕ

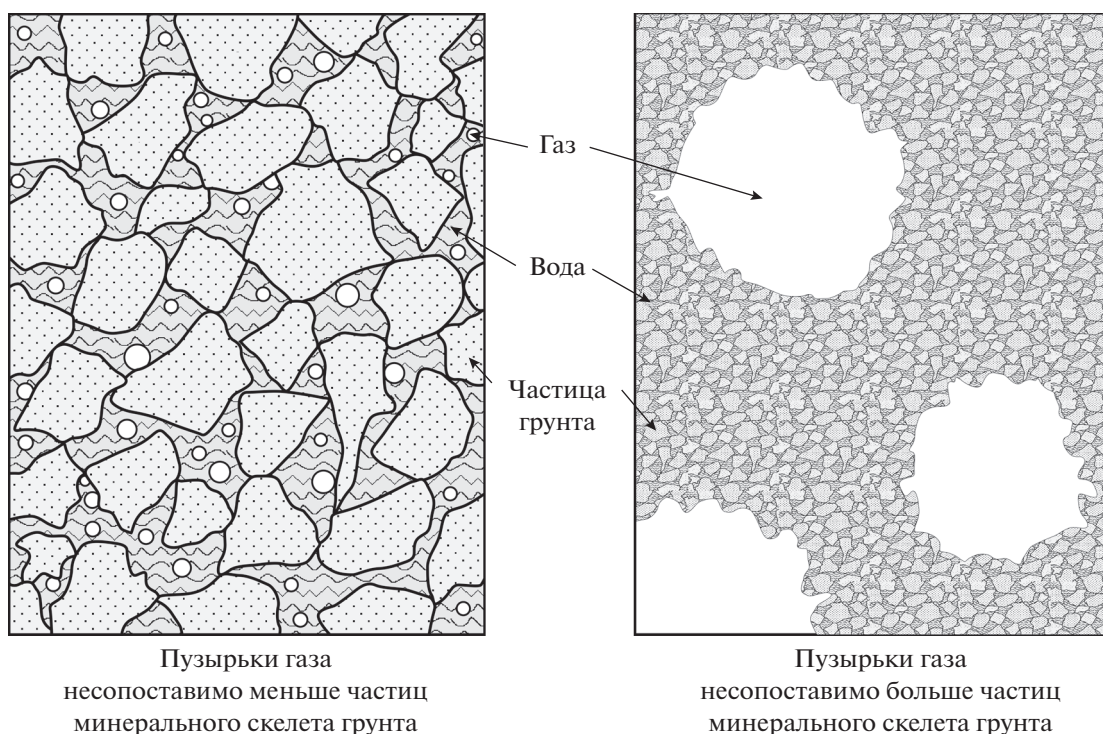
Газонасыщенные грунты широко распространены в донных отложениях, газ в них чаще всего представлен метаном и находится в условиях гидростатического давления, значительно превышающего атмосферное [26]. Именно с такими грунтами во многих случаях связано развитие субаквальных оползней, но закономерности изменения свойств глинистых грунтов при газонасыщении, а соответственно расчет и моделирование развития и активизации оползневых процессов, в значительной степени остаются слабо изученными. Во многом это обусловлено изменением их строения при извлечении керна на поверхность, в ходе подготовки и проведения ис-

пытаний, что приводит к неопределенности и противоречивости результатов испытаний.

Цель проведения исследований – разработка метода подготовки образцов газонасыщенных глинистых грунтов и определение закономерностей изменения строения и свойств придонных глинистых грунтов в зависимости от их газонасыщенности.

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СУБАКВАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

Один из основных параметров содержания газа в донных отложениях – степень насыщения  $S$ , равная отношению суммы объема воды и свобод-



**Рис. 1.** Схема строения субаквальных грунтов, содержащих газовую компоненту [5].

ного газа к объему пустот в грунте [12]. Степень насыщения субаквальных грунтов газом зависит от давления, оказываемого на грунт водной толщей и вышележащими отложениями. Согласно исследованиям [12] при  $S > 90\%$  в субаквальных грунтах могут существовать газы, не только растворенные в воде, но и в свободном состоянии. Большинство исследований газосодержащих отложений направлены на изучение грунтов с насыщением в среднем более 85% [12, 15, 16, 20, 21, 32, 37].

Газ в субаквальных грунтах может находиться в свободном (пузырьки), защемленном (мениски), растворенном состоянии, а также в виде молекул, сорбированных на поверхности минеральных частиц [34]. Хотя газ в растворенной форме сам по себе не влияет на механические свойства грунтов, формирование или диссоциация газовых гидратов и захваченных пузырьков газа могут значительно изменить характеристики грунтов [18, 26]. Состояние нерастворенного газа (пузырькового) в грунте зависит от соотношения давления газа и давления поровых вод, а также от сил поверхностного натяжения на границах раздела фаз и радиуса кривизны менисков (рис. 1).

Газовые включения по свойствам резко отличаются от твердой и жидкой компонент грунтов, а их наличие оказывает влияние на физические [33], механические [16, 34], акустические [9] свойства вмещающих грунтов. Наибольшее влияние на свойства субаквальных грунтов оказывают сво-

бодные и защемленные газы. При этом степень влияния газовых включений на механические свойства грунта зависит от их относительного объема и величины порового давления [36]. Наличие свободных газов в грунте обусловлено поровым давлением, концентрацией газа и коэффициентом его растворимости. Исследования [12] показали, что, в то время как согласно лабораторным экспериментам коэффициент растворимости метана около 0.030, натурные исследования подводных отложений показывают значения, близкие к 0.002.

При понижении давления в поровой воде выделяются газы в виде пузырьков. Аналогичное явление часто возникает при подъеме с глубины водонасыщенных образцов пород при бурении скважин: из-за разницы в них пластового и атмосферного давления начинают бурно выделяться пузырьки растворенных газов. Выделение растворенных и защемленных газов сопровождается ослаблением структурных связей между частицами в грунте и его разупрочнением [6].

Исследованию газонасыщенности донных отложений посвящено множество работ, как методических, так и практических. В методических работах чаще всего рассматриваются способы измерения содержания выделявшегося газа, например: Head-space – метод свободного отделения газа от образца грунта [1]; метод извлечения газа при помещении образца в вакуум [14]; выделение окклюдированного газа – перемешиванием об-

разца грунта в шаровой мельнице [11] или в кухонном блендере [29], а также с помощью шейкера [31, 37]; выделение газа, адсорбированного в молекулярной структуре минерального скелета, — извлечение путем разложения кристаллической решетки глинистых минералов горячей фосфорной кислотой [13, 14].

Практические работы посвящены, как правило, картированию газонасыщенности отложений в акваториях и дальнейшей интерпретации данных [7, 31, 38]. В последнее время наибольший интерес представляют исследования осадочных отложений, включающих в себя включения газовых гидратов [10, 24, 39, 40], и непосредственно самих природных газовых гидратов.

Отдельные теоретические модели, описывающие поведение газонасыщенных дисперсных грунтов, представляющие наибольший интерес, рассмотрены в данной работе.

В [35] С. Уиллер (S.J. Wheeler) предложил методику оценки сопротивления грунтов недренному сдвигу. Выведенные в его работе теоретические кривые ограничивают диапазон значений прочности, которые могут быть выше, равны или ниже, чем прочность при предельном насыщении грунта газом. Хотя эти верхние и нижние граничные значения могут быть применены для оценки, эта модель не позволяет получить количественных параметров значения прочности. S.D. Thomas [30] охарактеризовал модель, которая дает простое описание поведения уплотнения газонасыщенных грунтов, но также не позволяет оценить величину их прочности.

Соотношения, предложенные S. Pietruszczak и G.N. Pande [22], позволяют получить количественный прогноз сопротивления грунтов недренному сдвигу; однако результаты их модели не были подтверждены лабораторными испытаниями. Позднее S. Pietruszczak и соавт. [23] для проверки своей модели опробовали экспериментальную программу на частично насыщенном песке Оттавы (хорошо сортированный кварцевый песок, вода, воздушная смесь). Прогнозные модели соответствовали наблюдаемому экспериментальному поведению грунта.

Разработке методики количественного прогноза величины прочности на недренный сдвиг газонасыщенных грунтов и улучшению модели, описывающей реакцию взаимодействия разного количества насыщенного газа в глинистых грунтах на растворимость газа и сжимаемость газовой фазы, посвящена работа J.L. Grozic [16]. Эта модель рассматривает основные прочностные характеристики грунта как постоянные (отсутствие деформаций в грунте) во время процессов расширения газа. Теоретическая модель предсказывает увеличение прочности при недренном сдвиге с уменьшением газонасы-

щенности из-за сжатия поровых флюидов. Модель учитывает влияние концентрации газа, напряжения консолидации, объемного коэффициента растворимости газа и объема пустот грунта на сопротивление недренному сдвигу как для газонасыщенных, так и водонасыщенных грунтов.

Устойчивость склоновых отложений в связи с их газонасыщенностью изучалась и отечественными исследователями. В частности, устойчивость газонасыщенных отложений рассмотрена на примере верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа С.И. Рокосом [4]. По его мнению, наличие в грунтах скоплений газа с избыточным пластовым давлением оказывает влияние на напряженное состояние грунтового массива, снижая литостатическое (бытовое) давление в нем, что может оказывать существенное влияние на расчетные оценки осадки фундаментов инженерных сооружений. Для полной и точной оценки напряженного состояния газонасыщенных грунтовых толщ представляется необходимым проводить измерения естественного порового (пластового) давления *in situ* [4].

Обобщенный анализ реакции газонасыщенных грунтов на действие сдвиговых нагрузок, проведенный по имеющимся литературным данным, представлен на рис. 2.

В целом анализ результатов исследований газонасыщенных дисперсных грунтов показывает, что современные теоретические представления об их строении и свойствах носят во многом эмпирический характер и не могут в полной мере качественно описать и количественно охарактеризовать влияние газов на их прочность.

Газонасыщенные грунты имеют более сложное строение по сравнению с двухкомпонентными грунтами, в составе которых газовая компонента отсутствует. При этом строение газонасыщенных грунтов может изменяться при подготовке и в ходе проведения испытаний, что практически невозможно контролировать при стандартных испытаниях грунтов на сдвиг. В результате этого реальное поведение газонасыщенных грунтов под действием сдвиговых нагрузок может существенно отличаться от теоретических положений, разработанных для сплошных тел.

Можно утверждать, что современные общепринятые методики определения прочности газонасыщенных дисперсных грунтов не дают полную достоверную ее характеристику. Это создает предпосылки для разработки специальной методики испытаний таких грунтов, которая позволяла бы контролировать и количественно учитывать характер их строения для объективной оценки их прочностных свойств. Для решения такой задачи авторами был применен метод газонасыщения грунтов путем их смешивания с газонасы-



**Рис. 2.** Влияние газа на сопротивление сдвигу грунтов. Анализ проведен по материалам исследований дисперсных грунтов [17, 19, 21, 25, 28, 35].

шенными цеолитами с контролируемыми параметрами. Результаты экспериментального определения влияния количественного содержания газов в грунтах на их прочность представлены в данной работе.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования были использованы образцы грунтов, отобранных в районе развития субаквального оползня Красноярский на оз. Байкал (рис. 3). Характерная особенность этого оползня – его приуроченность к скоплению придонных газовых гидратов у подножия склона. Согласно сформулированным гипотезам образования оползня Красноярский [3], ключевым фактором, контролирующим положение тела оползня на склоне авандельты р. Селенга, является аномальная (повышенная относительно фоновых значений) газонасыщенность придонных отложений.

Субаквальный оползень был обнаружен в ходе интерпретации результатов съемки, выполненной в 2009 г. многолучевым эхолотом. Оползень расположен в нижней части склона авандельты р. Селенга на расстоянии около 16 км от береговой линии. У подножия оползня располагается сип “Красный Яр”<sup>1</sup>, для которого характерно проявление скоплений приповерхностных газовых гидратов [8].

<sup>1</sup> Сип – место высачивания газа из донных осадков.

Образцы представляют собой набор кернов, отобранных в различных частях дна в районе развития субаквального оползня Красноярский:

- TTR-BL17-261G – участок дна, наиболее удаленный от оползня и сипа “Красный Яр”;
- TTR-BL19-441G – тело оползня;
- TTR-BL19-442G – не нарушенная оползанием часть склона, расположенная выше сипа “Красный Яр”, вблизи оползня;
- TTR-BL19-443G – область развития сипа “Красный Яр”.

Отложения схожи по минеральному составу, что подтверждено данными рентген-дифракционного анализа. Свойства образцов представлены в табл. 1.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение субаквальных склонов, затронутых современными процессами оползания или рассматриваемых как потенциально оползневые, в связи с тектонической активностью региона или активностью процессов флюидоразгрузки, а также повышенной газонасыщенностью осадков, производится, как правило, методами геофизической съемки (сейсмоакустическое профилирование). В настоящей работе рассматривается влияние газовой компоненты на механические свойства грунтов, слагающих склон акватории оз. Байкал, по результатам лабораторных исследований.

Идея использования цеолитов подчерпнута из работы S.J. Wheeler [34]. Предложенный им метод был модифицирован в связи с задачей определе-

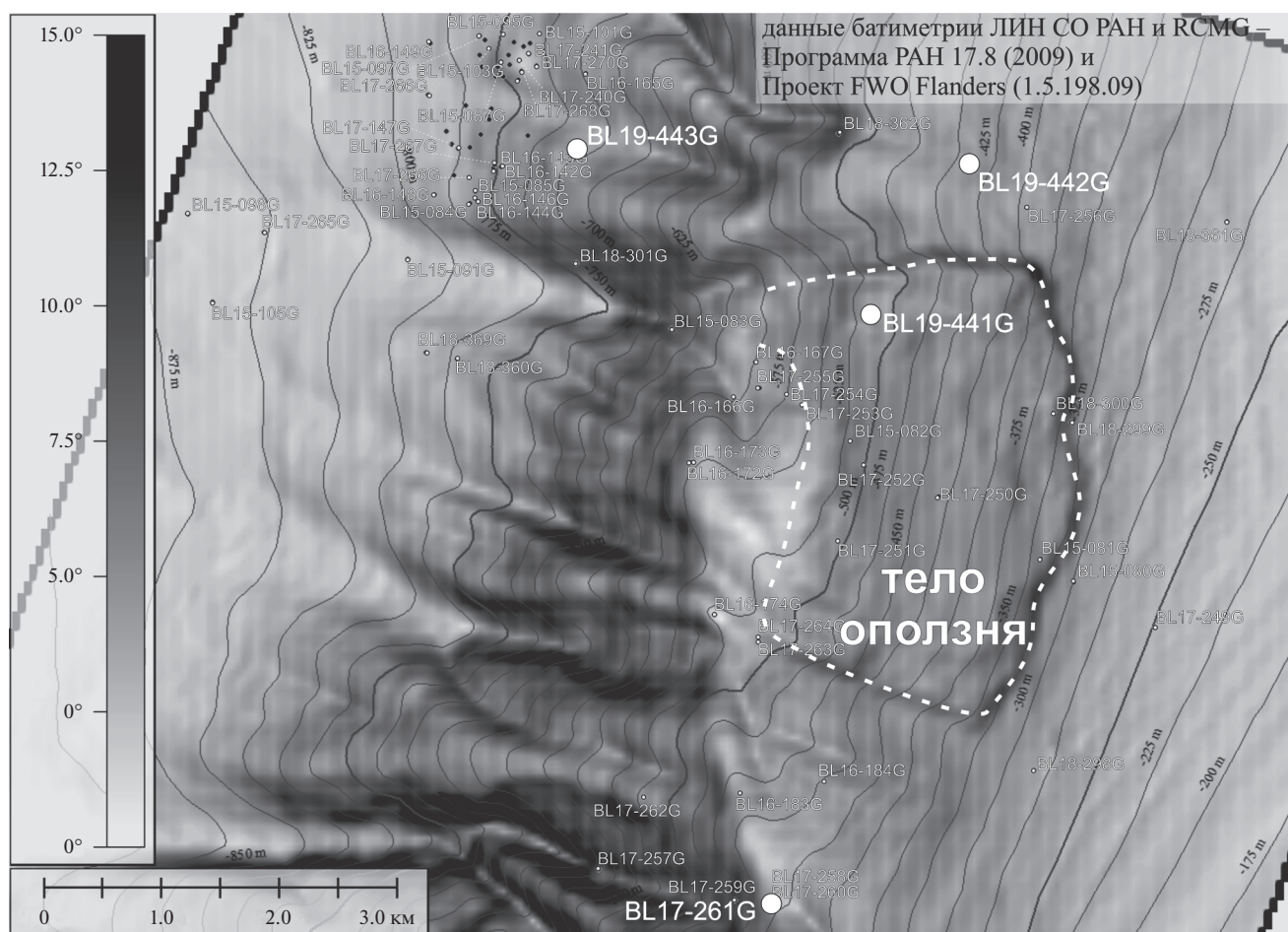


Рис. 3. Батиметрическая схема района развития оползня Красноярский.

ния прочностных характеристик для образцов грунтов, отобранных на полигоне исследований, с сохранением их влажности.

Цеолиты – это химически инертные соединения (природные и искусственные), которые обладают по структуре химической связи родством к полярным молекулам, таким как вода. Цеолиты – большая группа близких по составу и свойствам минералов, водные алюмосиликаты кальция и натрия из подкласса каркасных силикатов, со стеклянными или перламутровым блеском, известные своей способностью отдавать и вновь поглощать воду в зависимости от температуры и влажности. Другое важное свойство цеолитов – способность к ионному обмену – избирательно выделять и вновь впитывать различные вещества, а также обменивать катионы.

Для имитации газонасыщения образцов грунта в цеолит вводится атмосферный воздух ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  и т.д.), который замещается молекулами воды, когда насыщенный газами цеолит смешивается с влажным грунтом. Выбор марки искусственного цеолита типа 5A, имеющий формулу  $Ca_{4.5}Na_3(AlO_2)_{12}30H_2O$ , был сделан путем сравне-

ния диаметра молекулы азота  $4 \text{ \AA}$  с размером пустот, заключенных в кристаллической решетке цеолита.

Цеолиты измельчаются до муки с размером частиц в 6 мкм. В специальную герметичную колбу с цеолитами закачивается атмосферный воздух под давлением 200 кПа, которое поддерживается в течение получаса. Такая процедура позволяет насытить кристаллическую решетку цеолитов молекулами атмосферного воздуха.

Интенсивность адсорбции элементов, составляющих газовую компоненту, на поверхности минеральных частиц меняется в ряду:  $CH_4 > CO_2 > N_2 > O_2 > H_2O$ . Поэтому адсорбированные газы по составу отличаются от газов, находящихся в свободном состоянии [2, 6].

Сравнение адсорбции  $N_2$  и  $CH_4$  показывает, что из смеси адсорбируется больше метана из-за более сильных взаимодействий с адсорбентом [5]. Это подтверждается моделированием адсорбции смеси  $CH_4/N_2$  [2], причем с ростом парциального давления азота происходит изменение состава флюидной фазы – азот замещает метан.

**Таблица 1.** Гранулометрический состав и физические свойства исследуемых грунтов (в естественном залегании)

Показатель		Станция №			
		TTR-BL17-261G	TTR-BL19-441G	TTR-BL19-442G	TTR-BL19-443G
Глубина от дна, см		170–210	350–390	180–220	320–360
Содержание частиц различного размера (в мм), %	1.0–0.5	0.7	–	0.4	0.3
	0.5–0.25	1.9	0.8	2.1	0.7
	0.25–0.1	0.9	0.3	0.7	0.8
	0.1–0.05	5.2	6.2	8.4	8.5
	0.05–0.01	4.8	6.3	8.7	8.6
	0.01–0.005	29.9	19.8	22.4	19.9
	<0.005	6.4	12.4	14.8	13.3
	<0.002	50.2	54.2	42.5	47.9
Влажность образца, %		64.6	67.4	77.2	80.6
Плотность, г/см <sup>3</sup>		1.66	1.64	1.53	1.51
Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>		2.73	2.74	2.72	2.73
Пластичность, %	WL	56.2	52.8	61.3	61.2
	WP	31.4	31.6	34.5	35.2
	I <sub>p</sub>	24.8	21.2	26.8	26.0
Показатель текучести, д.е.		1.34	1.69	1.59	1.75

Затем цеолит механически перемешивают с грунтом. Цеолиты, содержащиеся в смеси, принимают молекулы воды, отдавая при этом в окружающее пространство молекулы газа (преимущественно азота). Образец устанавливается в сдвиговый прибор, на него передают нормальное давление. В результате образец уплотняется, его объем уменьшается, а в его структуре формируются пузырьки свободного газа, что продемонстрировано ниже по стереометрическим данным строения образцов грунта.

Техника приготовления модельных образцов с помощью газонасыщенных цеолитов позволяет имитировать процессы образования пузырьков газа, которые происходят в морской среде, например, при которых метан образуется вокруг ядер метаногенерирующих бактерий в водонасыщенном уплотняющемся грунте. В лабораторных испытаниях частицы цеолита образуют в грунте ядра формирования пузырьков газа, что позволяет предполагать формирование аналогичной структуры грунта и в естественных условиях морского дна.

В настоящей работе образцы, исходя из соображений безопасности, насыщались атмосферным воздухом. Для контроля объема (концентрации) газа, который цеолиты “передают” к грунтовой пасте, были проведены измерения на хроматографе. Газ из подготовленных образцов был извлечен, грунт дегазировался согласно стандартной методике Head-space [37].

Для установления зависимости концентрации газа от массы цеолитов было проведено 20 изме-

рений, по 5 для каждого из образцов. С 1000 г грунта было смешано 0, 5, 10, 15 и 20 г газонасыщенных цеолитов, и для каждого образца выполнены дегазация и последующее изучение состава газа на газовом хроматографе.

Газовая хроматография выполнялась на портативном газовом хроматографе “Хроматэк-газ-хром 2000” с двумя детекторами по теплопроводности (детектор с повышенной чувствительностью на углеводородные газы и детектор на неуглеводородные газы). В результате было получено отношение концентраций газов из газовой смеси, а также их отношение к атмосферному воздуху, что и послужило параметром, определяющим влияние цеолитов на газонасыщенность грунта.

Определение прочностных характеристик грунтов проводилось на специально подготовленных модельных образцах. Образцы подготавливались из 4 близких по строению разрезов грунтов, отобранных на разных геоморфологических участках акватории оз. Байкал, в районе развития субаквального оползня Красноярский. Навески грунтов массой 1000 г смешивались с 5, 10, 15 и 20 г газонасыщенных цеолитов соответственно. Из полученных смесей, а также из исходных грунтов, в которые цеолиты не добавлялись, изготавливались модельные образцы. Испытания на одноплоскостной срез проводились в недренированных условиях с измерением порового давления, что позволяет определить сцепление ( $C$ ) и угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) грунтов в эффективных напряжениях. Испытания прово-

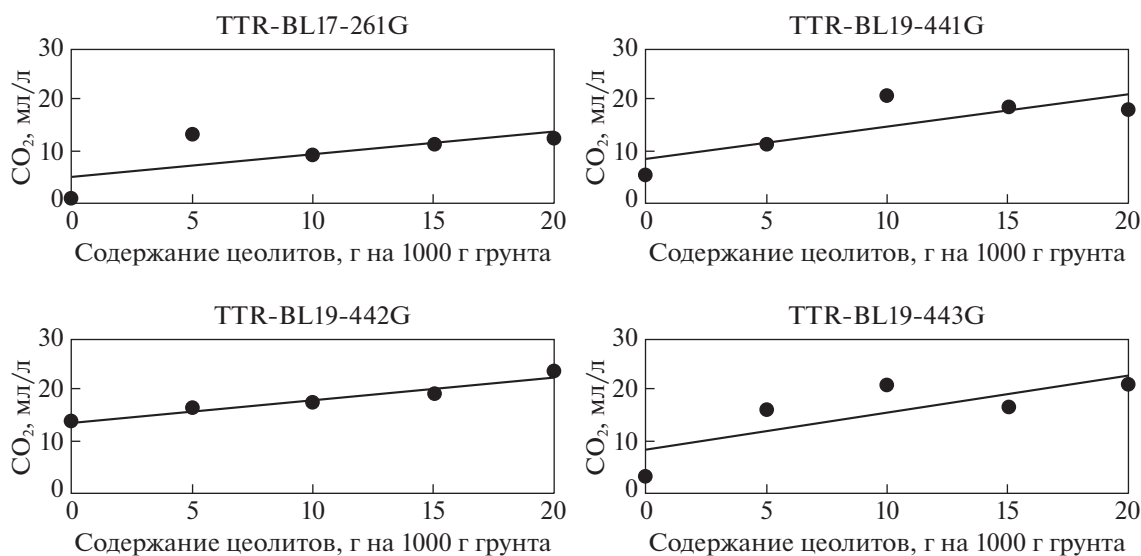


Рис. 4. Изменение концентрации углекислого газа в модельных образцах грунта в зависимости от массы цеолитов.

дидлись методом одноплоскостного среза, так как именно этот метод позволяет наиболее точно моделировать естественные условия субгоризонтальных нагрузок, приводящих к развитию оползневых процессов.

Для контроля выполнения условия наличия пустот, образованных в ходе дегазации цеолитов, была выполнена съемка 6 образцов на компьютерном томографе SkyScan 1172. Разрешение съемки – 6.5 мкм. Для пробоподготовки грунта к изучению на компьютерном томографе образцы были помещены в пластиковые цилиндры, внутренним диаметром 10 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате изучения содержания газа в модельных образцах было установлено, что из атмосферного воздуха цеолиты поглощают молекулы углекислого газа, размер которых составляет 3 Å, также удалось установить линейное увеличение концентрации поглощаемого цеолитами газа по мере увеличения массовой доли цеолитов в смеси с грунтом (рис. 4).

Концентрация свободного газа в образцах, полученная при их взаимодействии с цеолитами, достигает значений 20–30 мл/л, что соответствует фоновым концентрациям газа в осадках изучаемого полигона оз. Байкал [31]. Последующее увеличение массовой доли газонасыщенных цеолитов в образцах позволит увеличить концентрацию газа, но при этом существенно изменит состав модельных образцов, что не может быть сопоставимо с естественными условиями залегания исследуемых грунтов.

Проведенные компьютерно-томографические исследования показывают, что такое изменение

содержания газов в грунтах приводит к существенному изменению их строения. Математический анализ результатов исследований показывает, что повышение концентрации газа в осадочных грунтах оз. Байкал приводит к закономерному увеличению количества пустот размером более 6.5 мкм в их структуре (табл. 2) и изменению параметра сферичности пустот (рис. 5). Исследования были проведены на образцах с ненарушенным (рис. 5б) и нарушенным (рис. 5в) сложением грунта, которые подверглись тому же механическому воздействию, что и образцы, смешанные с цеолитами; на образцах с добавлением цеолитов в количестве 0.5% от массы грунта (рис. 5г), и 2% от массы грунта (рис. 5д).

Параметр сферичности 3-мерного объекта представляет собой отношение площади поверхности сферы (того же объема, что и данный объект) к площади поверхности частицы. Сферичность сферы равна единице по определению, сферичность любой другой формы <1. Использование параметра сферичности позволяет определить приближенность морфологии пустот, образованных вследствие газонасыщения грунтовой пасты цеолитами, к форме сферы, что позволяет сопоставить проводимый эксперимент с моделью образования газовых пузырей в условиях естественного залегания грунтов при повышении их газонасыщенности.

На гистограммах сферичности пустот для каждого из изученных образцов (рис. 6) наглядно прослеживается тенденция к смещению моды к 1, т.е. к распределению показателя, полученному для образца грунта с разрушенными газовыми гидратами, представляющего собой пример образованных в естественных условиях “пузырьковых” пустот.

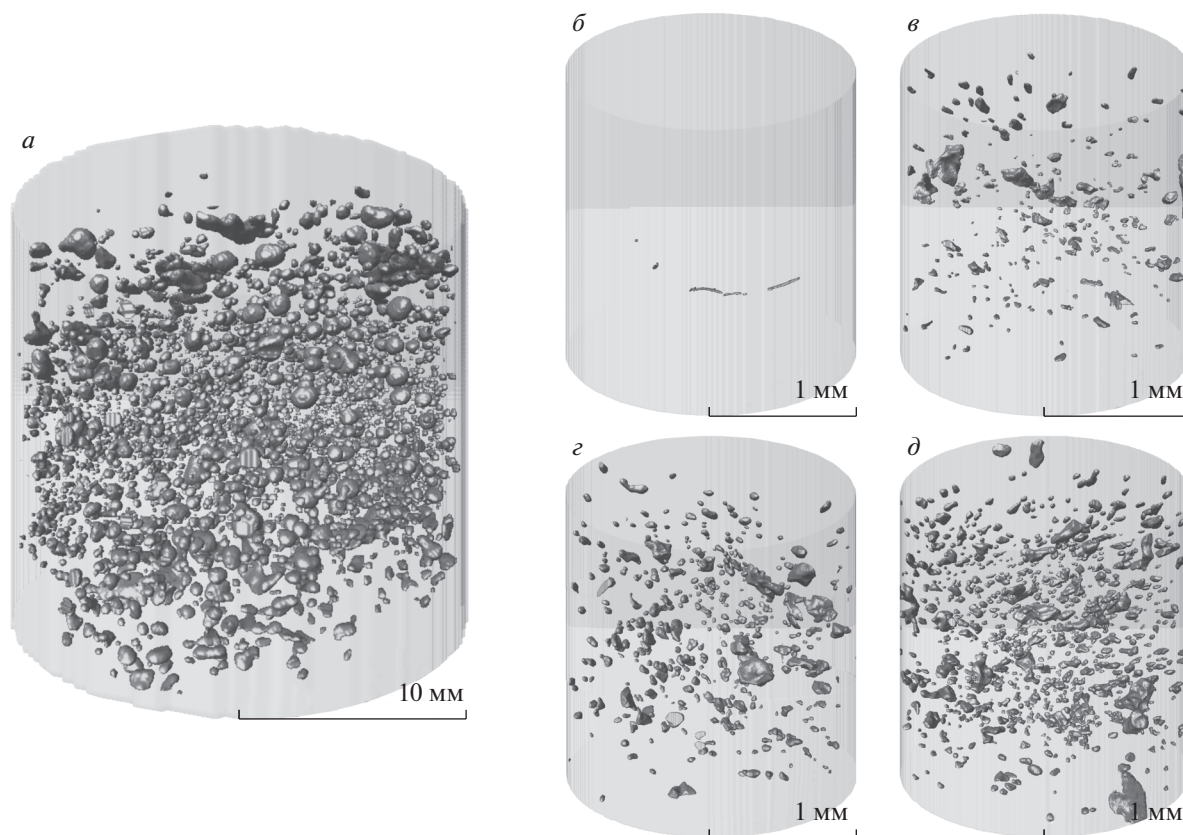
**Таблица 2.** Математический анализ строения пустотного пространства в образцах грунтов

Образец	Характеристика	Количество пустот размером > 6.5 мкм, %	Параметр сферичности пустот (преобладающие значения), д.е.
TTR-BL19-441G	Ненарушенный интервал разреза	0.03	0.5
	Механически нарушенный интервал разреза	0.7	0.50–0.53
	Механически нарушенный интервал разреза с добавленными на 1000 г грунта:		
	5 г цеолитов	1.29	0.50–0.55
	10 г цеолитов	1.25	0.50–0.55
TTR-BL17-288G	15 г цеолитов	1.13	0.61–0.71
	20 г цеолитов	2.5	0.76–0.82
	Интервал разреза с включениями газовых гидратов.	9.1	0.84
	Станция из области распространения придонных газовых гидратов грязевого вулкана “Большой”, оз. Байкал		

Результаты проведенных исследований показывают, что увеличение концентрации газа в грунтах при их взаимодействии с газонасыщенными цеолитами вызывает изменение их строения, аналогичное изменениям структуры грунтов в естественных условиях акватории оз. Байкал

при их насыщении газами. Это свидетельствует, что метод смешивания позволяет объективно моделировать процесс газонасыщения грунтов в естественных условиях.

Изменение структуры грунтов при их газонасыщении определяет соответствующее измене-



**Рис. 5.** Трехмерные модели пустот в образцах грунта. *a* – пустоты, образованные в интервале полноразмерного керна грунта за счет быстрой диссоциации газовых гидратов при подъеме керна со дна акватории (станция TTR-BL17-288G экспедиции Class@Baikal); пустоты в пробе грунта: *b* – ненарушенного сложения, *в* – механически нарушенной; механически нарушенной и смешанной с газонасыщенными цеолитами: *г* – 0.5% и *д* – 2% от массы грунта.



**Таблица 3.** Сцепление (С) и угол внутреннего трения (φ) грунтов, смешанных с газонасыщенными цеолитами

Станция пробо- отбора керна	Масса цеоли- тов на 1000 г грунта, г	Сцепление С, кПа	Угол внутрен- него трения φ, град.
TTR-BL19-442G	0	28	7
	5	16	6
	10	13	2
	15	12	4
TTR-BL19-441G	0	34	5
	5	29	4
	10	35	4
	15	26	1
	20	18	1
TTR-BL19-443G	0	21	10
	5	9	7
	10	8	6
	15	7	9
	20	6	7
TTR-BL17-261G	0	19	10
	5	15	8
	10	14	4
	15	12	2
	20	0	1

ние их свойств. Сдвиговые испытания, результаты которых приведены в табл. 3 и показаны на рис. 7, позволили охарактеризовать закономерность этих изменений.

Полученные данные показывают, что изменение строения глинистых грунтов при увеличении количества газов в их составе закономерно приводит к снижению их прочности. Это проявляется в уменьшении как величины сцепления, так и значений угла внутреннего трения. Такие данные повышают достоверность изучения процесса формирования оползней в газонасыщенных глинистых грунтах и должны использоваться при проведении расчетов и моделирования этих процессов.

Достоверность применения описанной методики подготовки образцов и проведения испытаний дополнительно подтверждает анализ морфологии пустот в исследованных грунтах. После проведения сдвиговых испытаний в образцах отмечается наличие визуально различимых пустот, образованных вследствие десорбции газа из цеолитов. Морфология этих пустот позволяет сделать вывод, что газ остается заключенным в них при действии нагрузки на образец; это может слу-

жить моделью среды газ-вода-грунт в естественных условиях залегания грунта.

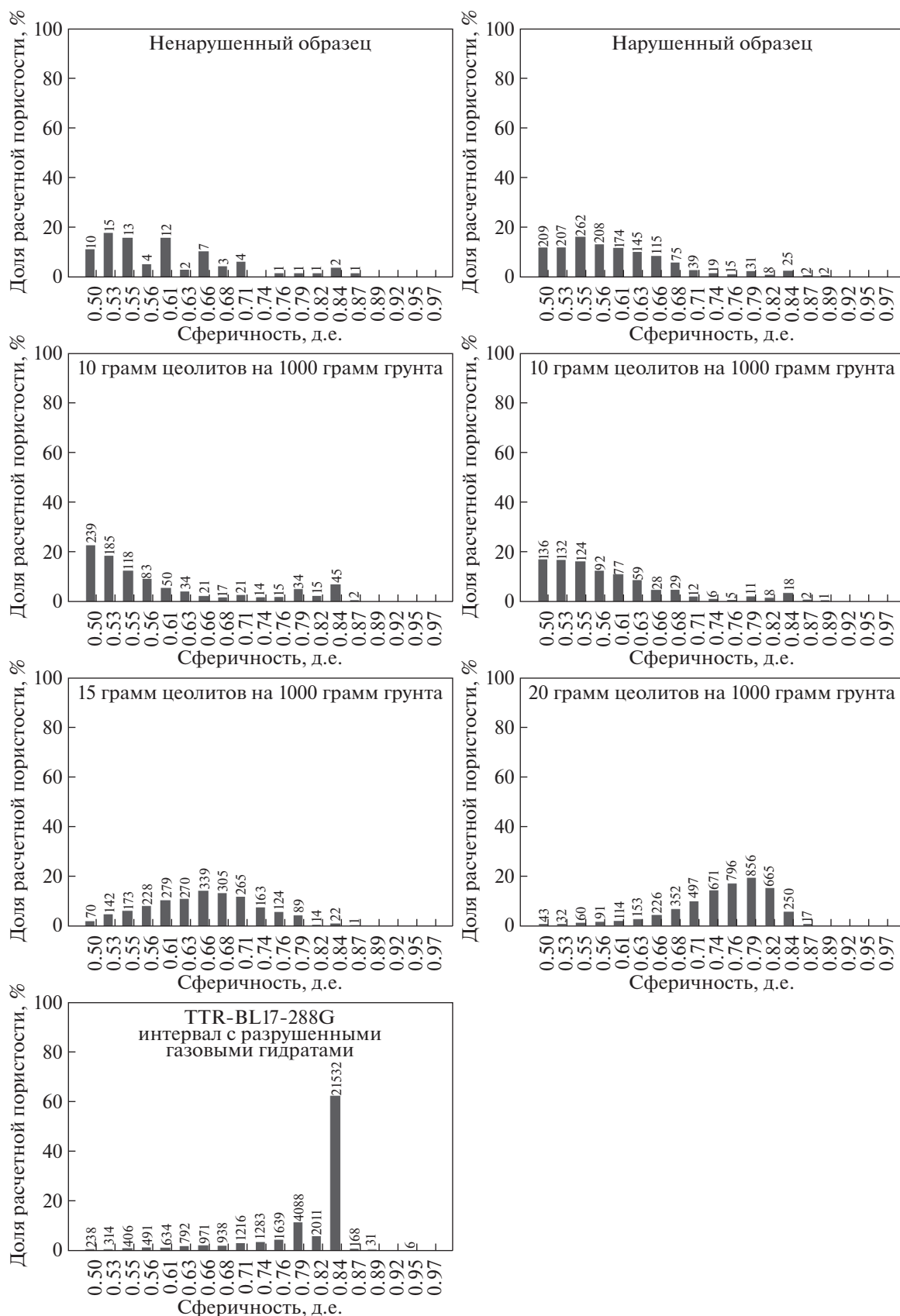
На рис. 8 изображены внешне отличимые полости в образцах грунтов, испытавших сдвиговые напряжения. Морфология и частота расположения пустот позволяют подтвердить их образование в ходе десорбции газа из цеолитов и насыщение газом пустотного пространства образца. Подобные текстуры наблюдались в работе [33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод искусственного газонасыщения грунтов показал свою работоспособность на примере изучения донных отложений оз. Байкал. С его помощью было подтверждено высказанное на основе литературных данных предположение о влиянии повышенного содержания свободного газа в грунте на его прочностные свойства (сцепление и угол внутреннего трения). Сопоставление количества газа в образцах (на основании данных газовой хроматографии) с закономерностью изменения их прочностных свойств позволило установить обратную зависимость между концентрацией свободного “пузырькового” газа в придонных отложениях акватории оз. Байкал и их прочностными характеристиками и структурой пустотного пространства. Изменение прочности грунтов при их газонасыщении проявляется как в изменении сцепления, так и в изменении величины угла внутреннего трения. Это свидетельствует о том, что определение параметров сопротивления недренированному сдвигу для газонасыщенных грунтов не позволяет дать достоверную характеристику их прочностных свойств. Для оценки зависимости прочности грунтов от содержания в них газовой компоненты испытания должны проводиться по схеме одноплоскостного среза.

Установленные закономерности позволяют обосновать дополнительные аргументы для объяснения причин формирования субаквальных гравитационных процессов, а также прогнозировать возможность формирования таких процессов. Такие аргументы могут быть получены из анализа данных по содержанию газа в грунтах *in situ* (геохимическая съемка), анализа геофизических данных (аномалии в сейсмоакустической записи, связанные с наличием скоплений газа в грунтах и каналами фильтрации газа в грунтах) и количественно оценены при помощи описанного в работе метода газонасыщения грунтов смешиванием с цеолитами. Первые два метода определяют возможность локализации воздействия газа на устойчивость грунтов, третий — оценить концентрацию газа в грунте, при которой устойчивость отложений достигает предельных значений.

Проведенные исследования позволяют заключить, что предложенный метод искусственного газонасыщения исследуемых образцов может ис-



**Рис. 6.** Гистограммы распределения сферичности пустот в образцах. Значения над столбцами указывают на количество пустот.

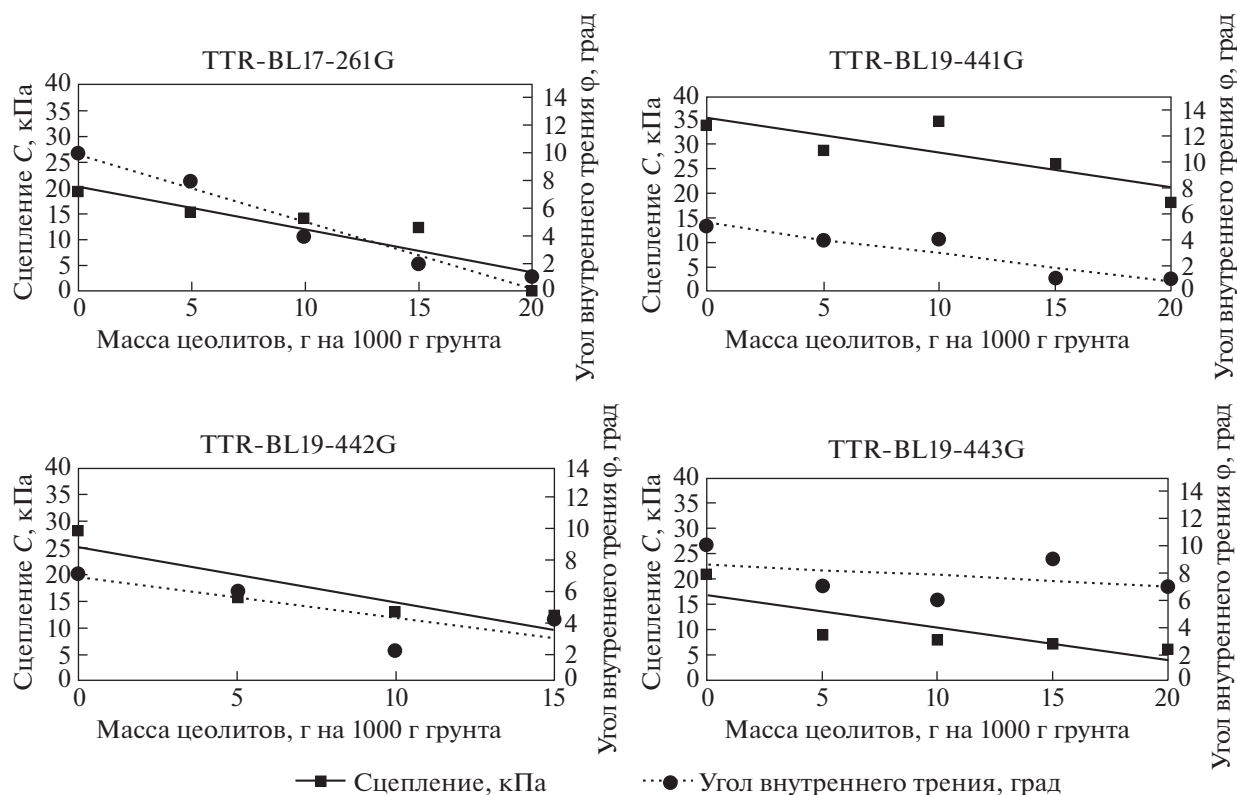


Рис. 7. Зависимость прочности грунтов от содержания газонасыщенных цеолитов.

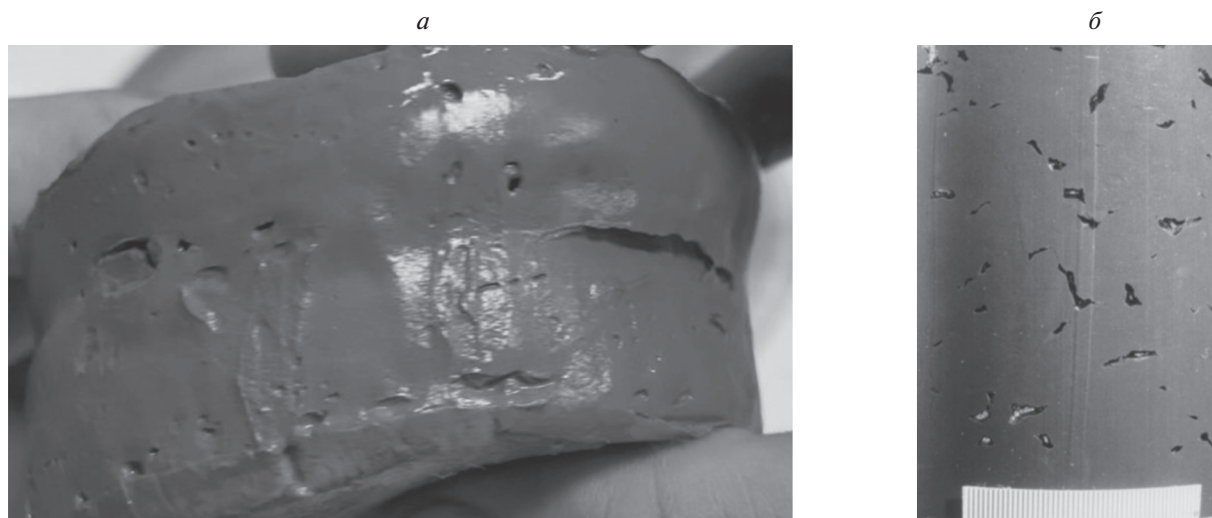


Рис. 8. Пустоты, сформировавшиеся в образце после испытания на одноплоскостной срез (а), и фотография газонасыщенных грунтов (б) по [27].

пользоваться при инженерно-геологических изысканиях на шельфе, в частности для моделирования воздействия областей развития фокусированной флюидоразгрузки в придонной толще дисперсных отложений.

Авторы выражают благодарность коллективу проекта Class@Baikal, работающему под эгидой

Плавучего Университета в рамках международной программы TTR Floating University, сотрудникам лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева, идейному вдохновителю Ахманову Григорию Георгиевичу и организатору экспедиционных работ на оз. Байкал Олегу Михайловичу Хлыстову.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков А.М., Егоров А.В.* Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 5. С. 861–862.
2. *Ванин А.А., Рул К., Пиотровская Е.М., Бродская Е.Н.* Адсорбция метана, азота и их смесей в порах слоистого углеродного адсорбента по данным компьютерного моделирования // *Журнал физической химии*. 2006. Т. 80. № 8. С. 1465–1472.
3. *Кудачев А.А.* Опыт исследований субаквального Красноярского оползня (оз. Байкал) // Матер. 5-й конференции “День науки 2020”. М.: “КДУ”, “Добросвет”, 2020. № 5. С. 58–61. <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.91304.0105>
4. *Рокос С.И.* Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: дис. ... канд. географ. наук. Мурманск: Мурман. мор. биол. институт КНЦ РАН, 2009. 89 с. <http://www.dslib.net/oceanologia/gazonasywennye-otlozhenija-verhnej-chasti-razreza-barencevo-karskogo-shelfa.html>
5. *Сизова А.А.* Компьютерное моделирование адсорбции и диффузии флюидов в углеродных и силикатных пористых материалах: дис. ....канд. хим. наук. С.-Петербург. гос. ун-т, 2015. 174 с. [https://disser.spbu.ru/disser2/disser/diss\\_sizova\\_a\\_a.pdf](https://disser.spbu.ru/disser2/disser/diss_sizova_a_a.pdf)
6. *Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А., Голодковская Г.А. и др.* Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
7. *Ульянова М.О.* Углеродородные газы в поверхностных донных осадках Юго-Восточной части Балтийского моря: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград: БФУ имени И. Канта, 2014. <http://www.dslib.net/oceanologia/uglevodorodnye-gazy-v-poverhnostnyh-donnyh-osadkah-jugo-vo-stochnoj-chasti.html>
8. *Хабуев А.В., Ченский Д.А., Соловьева М.А., Белюсов О.В. и др.* Оценка ресурсов газовых гидратов геофизическими методами в зоне подводной разгрузки газа на сипе “Красный Яр” озера Байкал // *Науки о Земле и недрапользование*. 2016. № 1 (54). С. 67–74.
9. *Anderson A.L., Hampton L.D.* Acoustics of gas-bearing sediments I. Background // *J. of the Acoustical Society of America*. 1980. V. 67. № 6. С. 1865–1889.
10. *Claypool G.E., Kaplan I.R.* The origin and distribution of methane in marine sediments // *Natural gases in marine sediments*. Springer, Boston, MA, 1974. С. 99–139.
11. *Emmel R., Bjorøy M., Grass G.* Geochemical exploration on the Norwegian continental shelf by analysis of shallow cores // *Petroleum geochemistry in exploration of the Norwegian Shelf*. Springer, Dordrecht, 1985. P. 239–246.
12. *Esrig M.I., Kirby R.C.* Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes // *Marine Georesources & Geotechnology*. 1977. V. 2. № 1–4. P. 81–100.
13. *Faber E., Stahl W.* Analytic procedure and results of an isotope geochemical surface survey in an area of the British North Sea // *Geological Society, London, Special Publications*. 1983. V. 12. № 1. P. 51–63.
14. *Gevirtz J.L., Carey B.D., Blanco S.R.* Surface geochemical exploration in the North Sea // *Geological Society, London, Special Publications*. 1983. V. 12. № 1. P. 35–50.
15. *Grozić J., Robertson P., Morgenstern N.* The behaviour of loose gassy sand // *J. Can. Geotech.* 1999. V. 36. № 3. P. 482–492.
16. *Grozić J.L., Nadim F., Kvalstad T.J.* On the undrained shear strength of gassy clays // *Comp. Geotech.* 2005. V. 32. Is. 7. P. 483–490.
17. *Hong Y., Wang L.Z., Yang B.* Undrained shear behaviour of gassy clay with varying initial pore water pressures // *Proc. of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*. Springer, Cham, 2018. P. 524–528.
18. *Jayasinghe A.G.* Triaxial Compression Strength of Methane Hydrate-Bearing Sediments. PhD Thesis. Calgary: University of Calgary. 2013. <https://doi.org/10.11575/PRISM/28526>
19. *Kaminski P., Urlaub M., Grabe J., Berndt C.* Geomechanical behaviour of gassy soils and implications for submarine slope stability: a literature analysis // *Geological Society, London, Special Publications*. 2020. V. 500. № 1. P. 277–288.
20. *Kar S., Phillips R.* Submarine slope failures in gassy soils // *Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. Paper No. OMAE2015-41829, V001T10A015.
21. *Nageswaran S.* Effect of gas bubbles on the sea bed behaviour. Thesis (Ph.D.), United Kingdom: University of Oxford. 1983.
22. *Pietruszczak S., Pande G.N.* Constitutive relations for partially saturated soils containing gas inclusions // *Journal of geotechnical engineering*. 1996. V. 122. № 1. P. 50–59.
23. *Pietruszczak S., Pande G.N., Oulapour M.* A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction // *Geotechnique*. 2003. V. 53. № 9. P. 833–838.
24. *Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V., DeFreitas D.A. et al.* Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope // *Geo-Marine Letters*. 1994. № 14. P. 110–119. <https://doi.org/10.1007/BF01203722>
25. *Sills G.C., Wheeler S.J., Thomas S.D., Gardner T.N.* Behaviour of offshore soils containing gas bubbles // *Geotechnique*. 1991. V. 41. № 2. P. 227–241.
26. *Sills G.C., Wheeler S.J.* The significance of gas for offshore operations // *In: Continental Shelf Research*. 1992. V. 12. № 10. P. 1239–1250.
27. *Sills G.C., Gonzalez R.* Consolidation of naturally gassy soft soil // *Geotechnique*. 2001. V. 51. № 7. P. 629–639.
28. *Sultan N., De Gennaro V., Puech A.* Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments // *Géotechnique*. 2012. V. 62. № 9. P. 751–766.
29. *Sweeney R.E.* Petroleum-related hydrocarbon seep age in a Recent North Sea sediment // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. № 1–3. P. 53–64.
30. *Thomas S.D.* A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressures in an unsaturated seabed I: theory // *Computers and Geotechnics*. 1989. V. 8. № 1. P. 1–38.
31. *Vidishcheva O.N. et al.* Hydrocarbon Gas Seepage along the Gydratny Fault (Lake Baikal) // *Moscow University Geology Bulletin*. 2021. V. 76. № 4. P. 353–365.
32. *Wang Y., Kong L., Wang M.* Liquefaction response of loose gassy marine sand sediments under cyclic loading // *Bul. Eng. Geol. Env.* 2018. V. 77.3. P. 963–976.

33. Wei J., Wu T., Liang J., Li W. et al. Physical properties of gas hydrate-bearing pressure core sediments in the South China Sea // *Geofluids*. 2021. V. 2021. P. 6636125.
34. Wheeler S.J. The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Hilary, 1986. 275 p.
35. Wheeler S.J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles // *Geotechnique*. 1988. V. 38. № 3. P. 399–413.
36. Wheeler S.J. A conceptual model for soils containing large gas bubbles // *Geotechnique*. 1988. V. 38. № 3. C. 389–397.
37. Whelan T., Coleman J.M., Roberts H.H., Suhayda J.N. The occurrence of methane in recent deltaic sediments and its effect on soil stability // *Bul. Eng. Geol. Env.* 1976. V. 13. № 1. P. 55–64.
38. Wu N., Zhang H., Yang S. et al. Gas Hydrate System of Shenhu Area, Northern South China Sea: Geochemical Results // *J. of Geological Research*. 2011. V. 2011.
39. Zander T. et al. Potential impacts of gas hydrate exploitation on slope stability in the Danube deep-sea fan, Black Sea // *Marine and Petroleum Geology*. 2018. V. 92. P. 1056–1068.
40. Zhang M., Niu M., Shen S., Dai S., Xu Y. Review of natural gas hydrate dissociation effects on seabed stability // *Natural Hazards*. 2021. V. 107. № 2. P. 1035–1045.

## EVALUATION OF THE EFFECT OF PORE WATER SATURATION WITH GAS ON PHYSICAL PROPERTIES OF FINE COHERENT (CLAY) SOILS BY MIXING WITH ZEOLITES

A. A. Kudaev<sup>a,#</sup>, F. S. Karpenko<sup>b,##</sup>, D. V. Korost<sup>a,###</sup>, O. N. Vidishcheva<sup>a,####</sup>, and M. M. Kuchukov<sup>b,#####</sup>

<sup>a</sup> Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119234 Russia

<sup>b</sup> Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

<sup>#</sup>E-mail: a.a.kudaev@gmail.com

<sup>##</sup>E-mail: kafs08@bk.ru

<sup>###</sup>E-mail: dkorost@mail.ru

<sup>####</sup>E-mail: vid6877@yandex.ru

<sup>#####</sup>E-mail: kuchukov.m@gubkin.ru

The method of preparing artificial samples (paste) of fine clay with a given gas saturation is described. The method consists in mixing zeolites presaturated with gas with bottom sediments. A pattern of changes in physical and mechanical properties due to varying water saturation, density and gas saturation was established for the samples. The proposed method allows modeling changes in the physical and mechanical properties of dispersed bottom sediments depending on the amount of gas, which is applicable for *in situ* conditions of bottom sediments, and changes in gas concentrations associated with both zones of focused discharge and the transformation of organic matter in bottom sediments. Modeling the soil saturation with gas on the slope, along which the subaqueous landslide developed, made it possible to estimate the contribution of gas component to the change in the strength characteristics of soils. The described method can be used in geological exploration for hydrocarbons in shelf conditions, as well as in engineering and geological surveys to assess the bearing capacity of soils when the gas saturation of bottom sediments changes.

**Keywords:** gas-saturated soils, bottom sediments, zeolites, gas saturation modeling, slope stability, subaqueous landslides, CT-scan

### REFERENCES

1. Bol'shakov, A.M., Egorov, A.V. *Ob ispol'zovanii metodiki fazovo-ravnovesnoi degazatsii pri gazometricheskikh issledovaniyakh* [The use of phase-equilibrium degassing method in gasometric studies]. *Okeanologiya*, 1987, vol. 27, no. 5, pp. 861–862. (in Russian)
2. Vanin, A.A., Rul, K., Piotrovskaya, E.M., Brodskaya, E.N. *Adsorbtsiya metana, azota i ikh smesei v porakh sloistogo uglerodnogo adsorbenta po dannym komp'yuternogo modelirovaniya* [Adsorption of methane, nitrogen and their mixtures in pores of lamellar carbon adsorbent by the computer modeling data]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2006, vol. 80, no. 8, pp. 1465–1472. (in Russian)
3. Kudaev, A.A. *Opyt issledovaniya subakval'nogo Krasnoyarskogo opolznya (oz. Baikal)* [Experience of studying the Krasnoyarsk subaqueous landslide (Lake Baikal)]. *Materialy 5-i konferentsii "Den nauki 2020"* [Proc. the 5th Science Day 2020 Conference]. Moscow, KDU, Dobrovosvet Publ., 2020, no. 5, pp. 58–61. (in Russian)
4. Rokos, S.I. *Gazonasyschennye otlozheniya verkhnei chasti razreza Barentsevo-Karskogo shel'fa*. [Gas-saturated deposits of the upper part of the section of the Barents-Kara shelf]. Cand. Sci. (Geogr.) Diss. Murmansk, Murmansk Marine Biological Institute, Kola Science Center RAS, 2009, 89 p. (in Russian)
5. Sizova, A.A. *Komp'yuternoe modelirovanie adsorbtsii i diffuzii flyuidov v uglerodnykh i silikatnykh poristyykh materialakh* [Computer simulation of adsorption and diffusion of fluids in carbon and silicate porous materials]. Cand. Sci. (Chem.) Diss., St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2015, 174 p. (in Russian)
6. Trofimov, V.T. Voznesenskii, E.A., Korolev, V.A., Golodkovskaya, G.A., et al. *Gruntovedenie* [Soil and rock engineering]. Moscow, MGU Publ., 2005, 1024 p. (in Russian)

7. Ul'yanova, M.O. Uglevodorodnye gazy v poverkhnostnykh donnykh osadkakh Yugo-Vostochnoi chasti Baltiskogo morya [Hydrocarbon gases in surface bottom sediments in the southeastern part of the Baltic Sea]. Cand. Sci. (Geogr.) Diss., Kaliningrad, Kant Baltic Federal University, 2014. (in Russian)
8. Khabuev, A.V., Chenskii, D.A., Solov'eva, M.A., Belousov, O.V. et al. *Otsenka resursov gazovykh gidratov geofizicheskimi metodami v zone podvodnoi razgruzki gaza na sipe "Krasnyi Yar" ozera Baikal* [Estimation of gas hydrate resources in the underwater gas discharge zone on the Krasny Yar seep of Lake Baikal by geophysical methods]. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 67–74. (in Russian)
9. Anderson, A.L., Hampton, L.D. Acoustics of gas-bearing sediments. I. Background. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, vol. 67, no. 6, pp. 1865–1889.
10. Claypool, G.E., Kaplan, I.R. The origin and distribution of methane in marine sediments. In: *Natural gases in marine sediments*. Springer, Boston, MA, 1974, pp. 99–139.
11. Emmel, R.H., Bjarøy, M., van Grass, G. Geochemical exploration on the Norwegian continental shelf by analysis of shallow cores. In: *Petroleum geochemistry in exploration of the Norwegian Shelf*. Springer, Dordrecht, 1985, pp. 239–246.
12. Esrig, M.I., Kirby, R.C. Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes. *Marine georesources & geotechnology*, 1977, vol. 2, no. 1–4, pp. 81–100.
13. Faber, E., Stahl, W. Analytic procedure and results of an isotope geochemical surface survey in an area of the British North Sea. London, Geological Society, Special Publications, 1983, vol. 12, no. 1, pp. 51–63.
14. Gevirtz, J.L., Carey, B.D., Blanco, S.R. Surface geochemical exploration in the North Sea. London, Geological Society, Special Publications, 1983, vol. 12, no. 1, pp. 35–50.
15. Grozic, J., Robertson, P., Morgenstern, N., The behaviour of loose gassy sand. *Can. Geotech. J.*, 1999, vol. 36, no. 3, pp. 482–492.
16. Grozic, J.L., Nadim, F., Kvalstad, T.J. On the undrained shear strength of gassy clays. *Comp. Geotech.*, 2005, vol. 32, no. 7, pp. 483–490.
17. Hong, Y., Wang, L.Z., Yang, B. Undrained shear behaviour of gassy clay with varying initial pore water pressures. Proc. of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer, Cham, 2018, pp. 524–528.
18. Jayasinghe, A.G. Triaxial compression strength of methane hydrate-bearing sediments. PhD Thesis. Calgary, University of Calgary, 2013. <https://doi.org/10.11575/PRISM/28526>
19. Kaminski, P., Urlaub, M., Grabe, J., Berndt, C. Geomechanical behaviour of gassy soils and implications for submarine slope stability: a literature analysis. Geological Society, London, Special Publications, 2020, vol. 500, no. 1, pp. 277–288.
20. Kar, S., Phillips, R. Submarine slope failures in gassy soils. Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2015, paper no. 56475, V001T10A015.
21. Nageswaran, S. Effect of gas bubbles on the sea bed behaviour. Thesis (Ph.D.), United Kingdom: University of Oxford. 1983.
22. Pietruszczak, S., Pande, G.N. Constitutive relations for partially saturated soils containing gas inclusions. *Journal of geotechnical engineering*, 1996, vol. 122, no. 1, pp. 50–59.
23. Pietruszczak, S., Pande, G.N., Oulapour, M. A hypothesis for mitigation of risk of liquefaction. *Geotechnique*, 2003, vol. 53, no. 9, pp. 833–838.
24. Sassen, R., Sweet, S.T., Milkov, A.V., DeFreitas, D.A., Salata, G.G., McDade, E.C. Geology and geochemistry of gas hydrates, central Gulf of Mexico continental slope. *Geo-Marine Letters*, 1994, no. 14, pp. 110–119. <https://doi.org/10.1007/BF01203722>
25. Sills, G.C., Wheeler, S.J., Thomas, S.D., Gardner, T.N. Behaviour of offshore soils containing gas bubbles. *Geotechnique*, 1991, vol. 41, no. 2, pp. 227–241.
26. Sills, G.C., Wheeler, S.J. The significance of gas for offshore operations. *Continental Shelf Research*, 1992, vol. 12, no. 10, pp. 1239–1250.
27. Sills, G.C., Gonzalez, R. Consolidation of naturally gassy soft soil. *Géotechnique*, 2001, vol. 51, no. 7, pp. 629–639.
28. Sultan, N., De Gennaro, V., Puech, A. Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments. *Géotechnique*, 2012, vol. 62, no. 9, pp. 751–766.
29. Sweeney, R.E. Petroleum-related hydrocarbon seep age in a Recent North Sea sediment. *Chemical Geology*, 1988, vol. 71, no. 1–3, pp. 53–64.
30. Thomas, S.D. A finite element model for the analysis of wave induced stresses, displacements and pore pressures in an unsaturated seabed I: theory. *Computers and Geotechnics*, 1989, vol. 8, no. 1, pp. 1–38.
31. Vidishcheva, O.N., et al. Hydrocarbon gas seepage along the Gydratny Fault (Lake Baikal). *Moscow University Geology Bulletin*, 2021, vol. 76, no. 4, pp. 353–365.
32. Wang, Y., Kong, L., Wang, M. Liquefaction response of loose gassy marine sand sediments under cyclic loading. *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2018, vol. 77, no. 3, pp. 963–976.
33. Wei, J. Wu, T., Feng, X. et al. Physical properties of gas hydrate-bearing pressure core sediments in the South China Sea. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, paper no. 6636125.
34. Wheeler, S.J. The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. PhD Thesis, Hilary, 1986, 275 p.
35. Wheeler, S.J. The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles. *Géotechnique*, 1988, vol. 38, no. 3, pp. 399–413.
36. Wheeler, S.J. A conceptual model for soils containing large gas bubbles. *Géotechnique*, 1988, vol. 38, no. 3, pp. 389–397.
37. Whelan, T., Coleman, J.M., Roberts, H.H., Suhayda, J.N. The occurrence of methane in recent deltaic sediments and its effect on soil stability. *Bul. Eng. Geol. Env.*, 1976, vol. 13, no. 1, pp. 55–64.
38. Wu, N. et al. Gas hydrate system of Shenhu Area, Northern South China Sea: geochemical results. *Journal of Geological Research*, 2011, vol. 2011.
39. Zander, T., et al. Potential impacts of gas hydrate exploitation on slope stability in the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, vol. 92, pp. 1056–1068.
40. Zhang, M. et al. Review of natural gas hydrate dissociation effects on seabed stability. *Natural Hazards*, 2021, vol. 107, no. 2, pp. 1035–1045.