

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

УДК 551.345

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТТАИВАЮЩИХ
СКЛОНОВ В РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ**

С. Е. Гречищев

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

В районах криолитозоны частое явление на склонах — внезапное оползание пылевато-глинистых грунтов сезонноталого слоя в результате роста сегрегационного льда на его подошве и смены периодов „теплых“ и „холодных“ лет. Изучаются физические и механические детали этого явления: представлены и обсуждаются результаты полевых экспериментов и математического моделирования.

Сегрегация льда, сезонноттаивающий слой, оползень, полевые исследования, математическое моделирование, поровое давление

MECHANICAL DETAILS OF THAWING SLOPE STABILITY IN PERMAFROST AREAS

S. E. Grechishchev

Earth Cryosphere Institute, 625000, Tyumen, 1230, Russia

In the permafrost area sudden quick sliding of the seasonally thawing layer (STL) on the silty-clayey slopes occurs due to growing of segregational ice in the STL bottom and variations in „warm-cold“ years. Physical and mechanical details of the phenomena have been studied. The results of the field experimental and mathematical modeling studies have been presented and discussed.

Ice segregation, seasonally thawing layer, slide, field study, mathematical modeling, pore water pressure

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в районах криолитозоны на границе между сезонноталым слоем грунта (СТС) и нижележащим вечномерзлым грунтом могут образовываться внутригрунтовые прослои сегрегационного льда. В дальнейшем возможно подтаивание сформировавшихся прослоев и катастрофическое уменьшение сцепления по оттаивающей поверхности. Этот процесс часто является причиной потери устойчивости грунтов СТС на склоне и в откосах насыпей.

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Особенности механики устойчивости грунтов СТС на склонах и откосах с сегрегационными прослоями льда изучались нами экспериментально в полевых условиях на п-ове Ямал и путем математического моделирования.

Возникновение оползней-спльвов на склонах п-ова Ямал связано с изменением во времени напряженно-деформированного состояния и прочности оттаивающих грунтов СТС. Соотношение между напряжениями в скелете грунта и его прочностью в связи с немонотонным харак-

тером оттаивания СТС может значительно меняться во времени.

Целью полевых работ являлось изучение режима изменения напряжений в скелете грунта на солифлюкционном склоне в натуральных условиях путем изучения соотношения между поровым давлением на границе оттаивания и уровнем грунтовых вод в СТС.

Исследования заключались в проведении режимных наблюдений за уровнем воды в специально оборудованных скважинах в процессе сезонного протаивания высокольдистых грунтов, слагающих СТС.

Район исследования находится на Севере Западной Сибири, на территории инженерно-геокриологического стационара Марре-Сале, расположенного на Карском побережье Западного Ямала и функционирующего с 1979 г.

Для проведения намеченных исследований была выбрана площадка 20×20 м² на склоне крутизной 7—10°, аналогичном склону, которые подвергались спльвам. На площадке были разбиты 5 изучаемых участков (ИУ — 1, 2, 3, 4, 5), которые образуют два профиля, расположен-

ных перпендикулярно друг другу. Участки ИУ-1, ИУ-2, ИУ-3 располагаются по профилю сверху вниз склона; ИУ-4, ИУ-2, ИУ-5 составляют профиль вдоль склона.

Каждый изучаемый участок состоит из двух скважин, отстоящих друг от друга на расстоянии не более 1 м, в которых производились измерения уровней воды. Одна из скважин каждого участка оборудована стальной трубой диаметром 2 см, на нижнем конце которой вмонтирован фильтр длиной 5 см с заглушкой на торце. Своим нижним концом эта труба постоянно находится на мерзлоте, а ее верхний конец выступает над поверхностью примерно на 1 м. Чтобы труба с фильтром все время стояла на мерзлоте, перед каждым измерением ее осаждали вниз до упора.

Вторая труба на каждом участке (также диаметром 2 см) предназначена для измерения уровня грунтовых вод (УГВ). Она не имеет заглушки на конце и выполняет роль обсадной трубы. Возле каждой трубы на всех участках проводились замеры глубины протаивания металлическим щупом в одних и тех же точках, что позволило контролировать нахождение трубы с фильтром на мерзлоте по отметкам на трубе.

При бурении скважин для обустройства подвижной и неподвижной труб, на всех пяти участках проводился отбор грунта для определения его свойств. Проведено также нивелирование всей площадки.

Бурение под подвижную трубу осуществлялось на глубину СТС, а при бурении скважин для наблюдения за УГВ — с заглублением в мерзлоту на 0,4—0,5 м. Скважины для наблюдения за УГВ оборудовались обсадной трубой с крышкой, чтобы избежать попадания в скважину поверхностных вод.

СТС площадки сложен в основном супесями и суглинками и незначительным слоем тонкозернистого песка. Почвенно-растительный слой имеет мощность от 0,04 до 0,1 м. Мерзлый суглинок — сильнольдистый с тонко-среднешлировой частотистой криотекстурой. Шлиры льда редко достигают мощности более 0,5 см.

Наблюдения и замеры начались в конце августа, закончились в середине сентября и проводились ежедневно с периодичностью 4 раза в сутки в течение трех недель.

По результатам измерений построены: 1) графики колебаний уровня воды в подвижной и неподвижной скважинах и график динамики глубины протаивания за период исследований для каждого из пяти изучаемых участков; 2) график колебаний разностей уровня воды ΔH в подвижной и неподвижной трубах и скорости протаивания, которая за период наблюдений в среднем составила 1 см в сутки, колеблясь от 0,5 до 1,4 см в сутки.

Для интерпретации измерений была рассмотрена одномерная задача фильтрационной консолидации оттаивающего слоя грунта, которая позволила получить следующее выражение для определения порового давления p на подошве оттаивающего слоя в зависимости от скорости оттаивания:

$$p = p_0 + \rho_w g H_w + \alpha \rho_s g \xi, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1 + \frac{E\beta}{\rho_s g \xi}}{1 - \frac{KE}{n \rho_s \xi H_w g}}; \beta = \frac{n}{1-n} 0,09; p_0 \text{ — атмосферное давление; } \rho_w, \rho_i, \rho_s \text{ — плотность воды, льда и скелета грунта соответственно; } n \text{ — пористость; } g \text{ — ускорение силы тяжести; } H_w \text{ — толщина слоя грунтовой воды; } \xi \text{ — толщина слоя оттаявшего грунта; } \dot{\xi} \text{ — скорость оттаивания; } K \text{ и } E \text{ — коэффициент фильтрации и модуль упругости очередного оттаивающего (уже безо льда) прослоя грунта непосредственно на границе оттаивания.}$$

К формуле (1) должны быть добавлены естественные ограничения:

$$0 \leq p \leq p_0 + \rho_w g H_w + \rho_s g \xi. \quad (2)$$

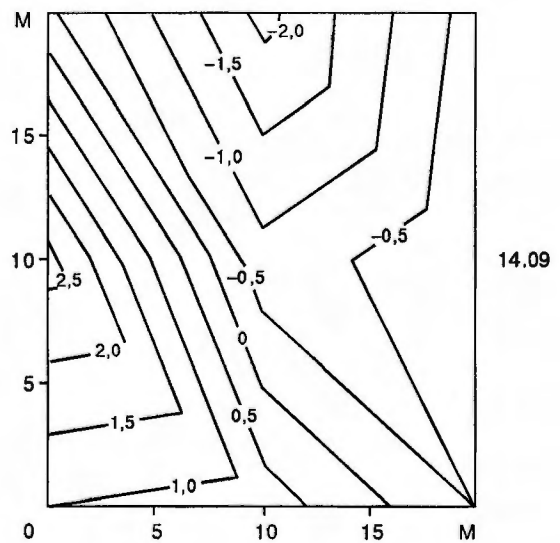
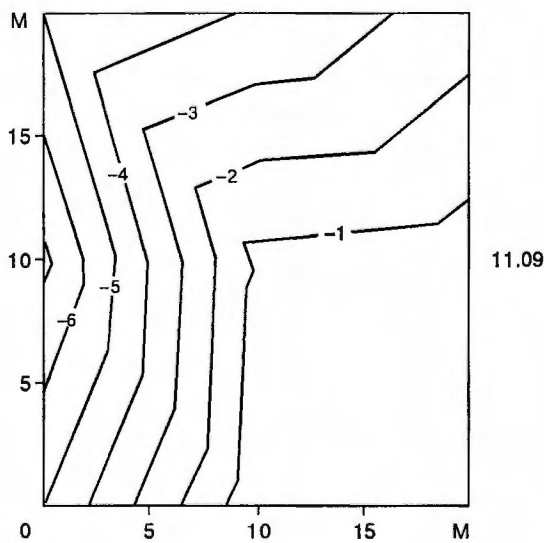
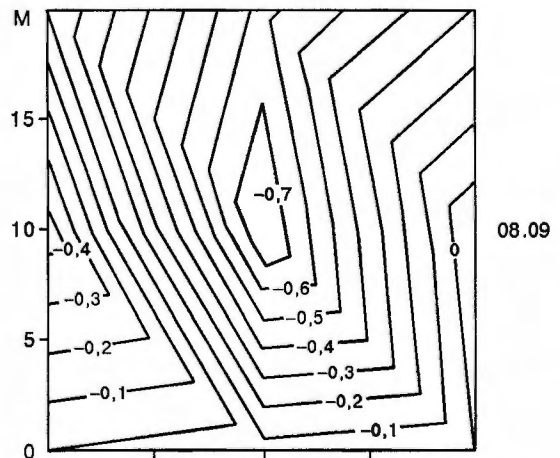
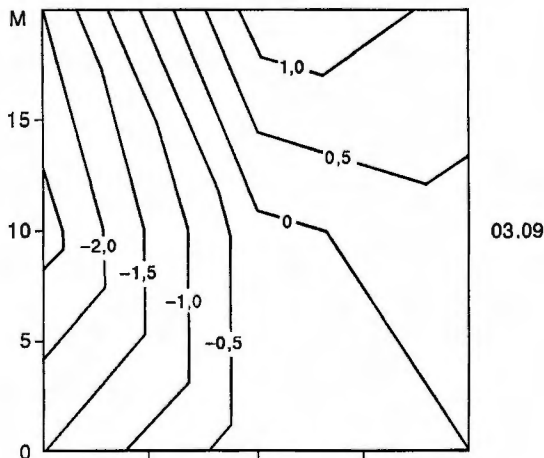
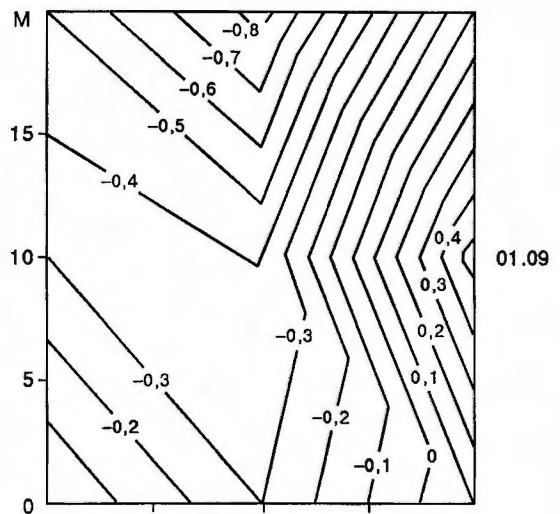
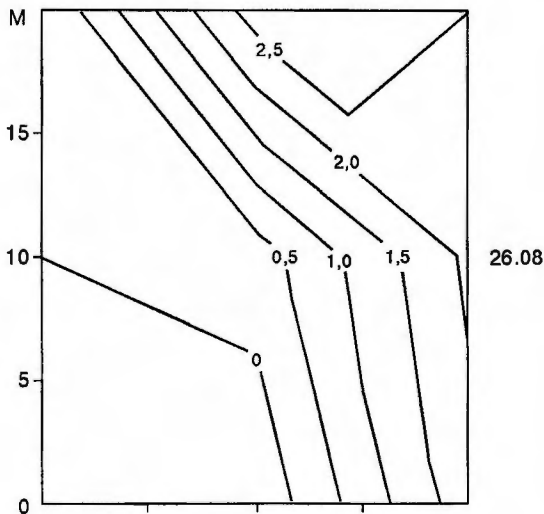
Ограничения (2) следуют из того, что поровое давление не может быть (а) меньше нуля (т. е. полного вакуума) и (б) больше давления от веса вышележащего оттаявшего слоя грунта.

Анализ формулы (1) показывает, что поровое давление на подошве оттаивающего слоя может быть как больше, так и меньше нормального давления, равного сумме первых двух членов в формуле (1). Это зависит от состава и свойств очередного оттаивающего элементарного прослоя. Если граница оттаивания попадает на ледяной шпир ($E = 0$ и, следовательно, $\alpha = 1$), то на ней должен возникать избыток порового давления. В случае, когда граница оттаивания проходит через идеально твердый грунтовый прослой (условно $E \rightarrow \infty$ и, следовательно, $\alpha < 0$), может возникать дефицит порового давления вплоть до полного вакуума.

В первом случае склон наименее устойчив, так как оттаявший слой как бы „плавает“ на подстилающем ледяном прослое. Во втором случае, наоборот, весь вес СТС давит на скелет грунта, т. е. сезонноталый слой как бы прилипает к склону, прижатый атмосферным давлением воздуха. Это случай максимальной устойчивости СТС.

Таким образом, принципиальным для анализа устойчивости склонов является дефицит или избыток порового давления — напора на подошве оттаивающего слоя ΔH , по сравнению с нормальным напором. Последний принимался

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТТАИВАЮЩИХ СКЛОНОВ



Изолинии приращений ΔH порового давления (в м вод. ст.) на подошве слоя сезонного оттаивания ММП в период с 26 августа по 14 сентября.

равным уровню грунтовых вод H_w в скважине с неподвижной трубой. На основании известного решения задачи о распределении поровых давлений в окрестности скважины, а также — выражения (1) зависимость ΔH от скорости оттаивания и от уровня воды в измерительных скважинах имеет вид:

$$\Delta H(t) = H_0(t) - H_w(t) - \frac{m}{\xi} [H_0(t) - H_0(t - \tau)], \quad (3)$$

где t — время, τ — интервал времени между измерениями, H_0 — уровень воды в скважине с подвижной трубой, m — величина, зависящая от геометрических характеристик измерительных устройств и рассматривавшаяся как эмпирическая константа.

На основании экспериментальных данных величина m была определена равной 0,2 м в сутки. Данные наблюдений, обработанные по формуле (3), представлены на рисунке.

Как видно на рисунке, поровое давление на подошве оттаявшего слоя в процессе оттаивания постоянно меняется, переходя от дефицита ($\Delta H < 0$) к избытку ($\Delta H > 0$) и наоборот. Как показано выше, это, по-видимому, связано с последовательным прохождением фронта оттаивания через ледяные и мерзлые грунтовые прослойки.

В разных точках склона прослойки льда или грунта оттаивают не одновременно. Поэтому в одной точке склона на подошве оттаивающего слоя может быть дефицит порового давления, а в другой точке — избыток. Это хорошо иллюстрируют схемы (см. рисунок), на которых для наблюдавшегося участка построены изолинии равных дефицитов/избытков порового давления на подошве оттаивающего слоя в разные моменты времени. По-видимому, на склоне неустойчивые участки с избытком порового давления могут находиться в окружении устойчивых с дефицитом порового давления или наоборот. Соотношение устойчивых и временно потерявших устойчивость участков определяет устойчивость склона в целом. Обращает на себя внимание существование на склоне зон с „вакуумом“ на подошве оттаивающего слоя.

Сегрегация льда в пограничной зоне между СТС и его основанием — многолетнемерзлыми породами (ММП) приводит в течение ряда „холодных“ лет к формированию внутригрунтового „переходного“ льдонасыщенного слоя [Шур, 1989]. Его формирование происходит в осенне-зимний период в результате промерзания снизу под действием потока холода от подстилающих ММП. Физико-химические, теплофизические и механические аспекты этого процесса с помощью

математического моделирования рассмотрены нами ранее в работе [Гречищев, Гречищева, 1997].

Было обращено внимание на тот факт, что полное вертикальное напряжение на поверхности промерзания снизу складывается из атмосферного давления и веса вышележащего материала. При этом давление сверху на поровую влагу в незамерзшей части водонасыщенного слоя равно атмосферному до тех пор, пока промерзание сверху не дошло до поверхности водонасыщенной зоны, после чего к поровому давлению подключается вес промерзшей сверху части. Возникновение такого (криогенного) напора подтверждается прямыми натурными измерениями [Гречищев и др., 1984]. Это означает, что в начале осеннего промерзания вся нагрузка от собственного веса СТС на подошве приходится на скелет грунта, и скорость сегрегации льда от промерзания снизу приблизительно пропорциональна следующему выражению:

$$q_s \approx \frac{L(T_0 - T_b)}{T_0} - v_i \bar{\rho} g H_{th}, \quad (4)$$

где L — теплота фазового перехода, $T_0 \approx 273$ К, T_b — температура на границе промерзания, v_i — удельный объем льда, $\bar{\rho}$ — средняя плотность грунта СТС, H_{th} — глубина до подошвы СТС.

После того как промерзание сверху достигнет водонасыщенной зоны СТС, скорость роста сегрегационного льда становится пропорциональной уже другому выражению:

$$q_s \approx \frac{L(T_0 - T_b)}{T_0} - (v_i - v_w) \bar{\rho} g H_{th}, \quad (5)$$

где v_w — удельный объем воды.

Поскольку v_i более чем в 10 раз превышает разность $(v_i - v_w)$, то сравнение двух выражений показывает, что после смыкания верхнего промерзания с водонасыщенной зоной возможность сегрегации льда в переходном слое резко возрастает. Это означает, что большую роль в этом процессе играет толщина слоя грунтовой (надмерзлотной) воды.

Отметим некоторые особенности сегрегационного льдонакопления в переходном слое.

Не образуются ледяные прослои в песках. Максимальное льдонакопление происходит в пылеватых супесях и суглинках, что совпадает с известными натурными наблюдениями.

Отмечается существование нижнего ($\approx 0,5$ Вт/м²) и верхнего (≈ 40 Вт/м²) пределов теплового потока вниз, критических по условию роста ледяных прослоев на подошве СТС. Очевидно, что тепловой поток меньше, чем $\approx 0,5$ Вт/м², не имеет достаточной мощности для преодоления веса и поднятия СТС. При тепловом же потоке больше 40 Вт/м² промерзание идет со

слишком большой скоростью, и фильтрация не успевает составить заметный вклад в льдосодержание. Обычный же тепловой поток вниз в естественных условиях составляет от 1,5 до 3,5 Вт/м².

В большинстве случаев рост сегрегационных шлиров льда начинается после смыкания подошвы СТС верхнего промерзания с уровнем грунтовой воды. Вследствие этого существует критическая толщина слоя полного водонасыщения, равная примерно 20—25 см, при которой (и меньшей) этот слой промерзает снизу раньше, чем до него доходит промерзание сверху, и тогда он не дает вклада в сегрегационное льдонакопление по упомянутым выше причинам.

Обычная толщина годового льдонакопления в переходном слое в пылеватых грунтах составляет первые миллиметры (до 1 см).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема опасности внутригрунтовых ледяных прослоев (если они образуются) для ус-

тойчивости склонов и откосов насыпей требует решения вопросов о толщине и местоположении прослоев, о возможности их многолетнего роста и о статистическом распределении теплых/холодных и влажных/сухих лет. Существование на подошве оттаивающего слоя зон с пониженным давлением свидетельствует о необходимости совершенствования методов расчета устойчивости склонов и откосов насыпей в районах криолитозоны.

Литература

Гречищев С.Е., Гречищева О.В. Особенности формирования переходного слоя и устойчивость насыпей в криолитозоне // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы междунар. конф. в Пушино (23—26 апреля 1996 г.). Новосибирск, Наука, 1997, с. 214—221.

Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. М., Наука, 1984, 236 с.

Шур Ю.Л. Термокарст и строение верхних горизонтов мерзлых пород. М., Наука, 1989, 150 с.

*Поступила в редакцию
28 мая 2002 г.*