
**ПРИРОДНЫЕ
И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

УДК 551.345

**ВЛИЯНИЕ КРИОГЕНЕЗА НА РАЗВИТИЕ
СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
СТЕПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ**

© 2015 г. А. Н. Хименков*, А. Н. Власов*^{***}, Д. О. Сергеев*, Е. А. Козырева*^{***},
А.А. Рыбченко*^{***}, В. А. Пеллинен*^{***}

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,

Уланский пер., 13, Москва, 101000 Россия. E-mail: cryo@geoenv.ru

**Институт прикладной механики РАН, Ленинградский пр., 7, Москва, 125040 Россия.

E-mail: bah1955@yandex.ru

***Институт земной коры Сибирского отделения РАН,

ул. Лермонтова. 128, Иркутск, 664033 Россия. E-mail: kozireva@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 10.03.2015 г.

В статье изложены результаты комплексных геоэкологических исследований опустынистостепных территорий о. Ольхон. На основании полевых мерзлотных исследований и анализа космических снимков получены новые данные, характеризующие влияние криогенного фактора на склоновые процессы. Рассмотрены результаты годовых автоматизированных почасовых геотемпературных наблюдений, проведенных в шурфе. Показана ведущая роль разнообразия микроландшафтов в развитии многолетнемерзлых пород на рассматриваемой территории. Предложены методы расчета устойчивости склонов, учитывающие специфику геологических условий и особенности механизмов оползневых процессов.

Ключевые слова: островная мерзлота, аридный климат, криогенный фактор, склоновые процессы.

ВВЕДЕНИЕ

В течение 2012–2013 гг. сотрудниками Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Института прикладной механики РАН и Института земной коры СО РАН проводились комплексные геоэкологические исследования северо-западной степной части о. Ольхон. Остров Ольхон расположен в средней части оз. Байкал и является составной частью междувпадинной перемычки – Академического хребта, разделяющего Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины оз. Байкал. В неотектоническом плане о. Ольхон относится к Ольхонскому поднятию и имеет наклон поверхности 2–8° и до 20° на северо-западе. Северо-западное побережье острова (где проводились исследования) – наклонно-пологое с мелкими заливами, сформировавшимися вследствие переработки водами озера рыхлых неоген-четвертичных отложений. О.И. Баженовой [2] район исследований отнесен к максимально аридным

опустынистостепным территориям. Для них характерны высокая чувствительность и быстрая реакция на изменения климата и хозяйственную деятельность. Средняя годовая сумма осадков 190–220 мм, среднегодовая температура воздуха –2.4 – –5.5 °С. В геоэкологическом отношении территория слабо изучена. В литературе встречаются лишь единичные материалы по данной теме. На схематической геоэкологической карте Ф.Н. Лещикова и Н.Е. Зарубина территория острова отнесена к области редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с температурами –0.2 – –0.5 °С и мощностью 9–30 м. В пределах острова лишь в двух точках отмечена мощность ММП 23 и 30 м. При этом ландшафтная обстановка, привязка, метод получения информации и ее источник не указываются [5]. Ю.К. Васильчук выделил мерзлотные торфяные бугры пучения [3] на юге острова, в разрезе залива Загли; псевдоморфозы по ледяным жилам описаны в [7]. На острове (у южной границы своего



Рис. 1. Местоположение территории проведения исследований на о. Ольхон (а) [<http://www.maps.google...>]; б – общий вид территории исследований (фото М.Г. Мнушкина).

распространения) ММП находятся в неустойчивом термодинамическом состоянии, что обуславливает значительные скорости их формирования и разрушения. В ходе работ удалось выявить и изучить участки современного распространения ММП, рассмотреть особенности их строения, выяснить влияние криогенного фактора на динамику экзогенных процессов.

Территория проведения работ расположена на северном побережье центральной части острова (рис. 1). К берегу озера приурочена зона шириной от 20 до 200 м с углами наклона поверхности от 8 до 80°, на которой наблюдается большое разнообразие склоновых процессов. Далее в глубь острова расположена незалесенная равнина (с небольшим уклоном 3–5°), поднимающаяся к его центральной части. Обе выделенные зоны пересечены ложбинами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На изучаемой степной территории с аридным климатом участки развития ММП приурочены к увлажненным и заболоченным днищам ложбин, заболоченным участкам подножья склонов. В литературе отмечается, что в этих условиях мерзлые породы залегают в виде линз мощностью 9–30 м и протяженностью до 100 и более метров. При оттаивании грунты переходят в пластичное и текучепластичное состояние, при этом наблюдаются значительные просадки [6]. В ходе проведения работ была поставлена задача – выяснить парагенетические связи между сменой микроландшафтов, изменениями криогенных условий и комплексом сменяющих друг друга экзогенных процессов.

В качестве объекта изучения влияния криогенного фактора на склоновые процессы в условиях опустыненных степей выбрана типичная для данной территории ложбина длиной около 1 км и шириной от 150 м (в верхней части) до 70 м (в нижней части) (рис. 2). Ложбина врезана в выровненную, слабо наклоненную на север поверхность. Наклон поверхности в верхней части не превышает 5°. Здесь поверхность сухая, покрыта травянистой растительностью со следами деградированного кочкарника (см. рис. 2, зона 1). На поверхности почвы прослеживается полигональность размером 0.5 × 1.0 м.

На расстоянии около 300 м от берега Байкала сухая поверхность сменяется влажным кочкарником (см. рис. 2, зона 2). Высота кочек 20–40 см, поперечник 30 × 40 см. Протяженность зоны зеленого кочкарника около 70 м. В непосредственной близости от зоны кочкарника на сухой поверхности днища ложбины имеется серия разрывов дернины в виде субпараллельных трещин длиной в 2–3 м и шириной 3–5 см, перпендикулярных направлению ложбины. В нижней части бортов под углом около 30° к ним прослеживаются оперяющиеся трещины в дернине. Ширина разрывов от 2 до 10 см, длина 2–3 м, расстояние между ними 3–5 м.

В нижней краевой части зеленого кочкарника отмечается выраженный перегиб. Угол наклона

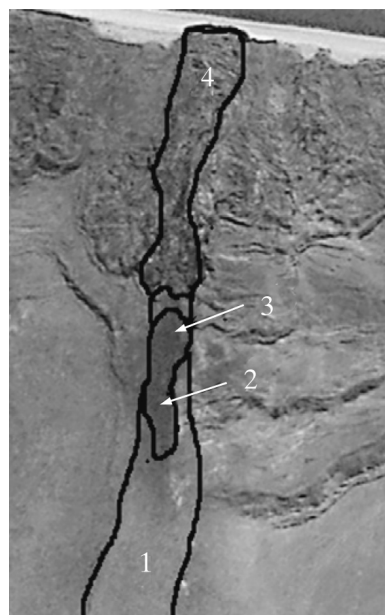


Рис. 2. Микроландшафтная зональность строения ложбины. Зоны: 1 – высохшего оторфованного кочкарника; 2 – влажного оторфованного кочкарника; 3 – просадок и разрывов примыкающая к уступу; 4 – развития оползней разжижения-течения.



Рис. 3. Трещины отседания (зона 3, см. рис. 2).

днища котловины меняется от 5 до 20°. На пониженном участке длиной около 15 м имеется серия поперечных трещин (трещины отседания) глубиной до 1 м и шириной до 30 см (см. рис. 2, зона 3; рис. 3). Зона трещин отседания заканчивается уступом высотой до 2 м.

Ниже, до самого озера, находится обводненная область потокового движения грунтового материала со следами течения, ограниченного уступами бортов, вытянутых вдоль склона (см. рис. 2, зона 4). Выделяется целая серия данных образований, соответствующих нескольким разновозрастным потокам. Протяженность области около 100 м. В нижней части грунтовые потоки выходят на пляж и вступают в зону волновой переработки озера.

В зоне увлажненного кочкарника была пробурена скважина 1 (рис. 4). На глубине 1.7–1.9 м были вскрыты мерзлые породы (непротаявший слой сезонного промерзания). Криотекстура слоистая, толщина ледяных шпиров до 2 см. Ниже до глубины 6.5 м залегает супесчано-суглинистый горизонт текучей консистенции, подстилаемый глинами мерзлыми с микрошпировой криотекстурой. Вскрытые межмерзлотные воды обладают напором, что определило их излияние на поверхность в течение 2 часов после окончания бурения.

Исследования температурного режима горных пород в 2012–2013 гг. и автоматизированные почасовые геотемпературные наблюдения проводились в шурфе (RU_04_Olkhon-Pit), расположенном на склоне ложбины в 50 м от скважины. Вблизи шурфа поверхность сухая, покрыта разреженной травянистой растительностью, геокриологические условия значительно отличаются от наблюдаемых на заторфованном днище ложбины.

Мерзлые породы прослежены от глубины 1.69 до 3.65 м. В плотных сухих суглинках встречены отдельные кристаллы льда и нитевидные шпирьы льда. Температурные измерения проводились датчиками HOBO®-U12-008 (компания Onset Computer Corporation), установленными на глубинах 0.5; 1.0; 1.5; 3.65 м и впоследствии засыпанными в шурфе. Данные годового хода температур представлены на рис. 5. Зафиксированная среднегодовая температура воздуха (с августа 2012 г. по июль 2013 г.) – –1.07 °С. Малое количество



Рис. 4. Геологический разрез скважины 1 (заторфованное днище ложбины).

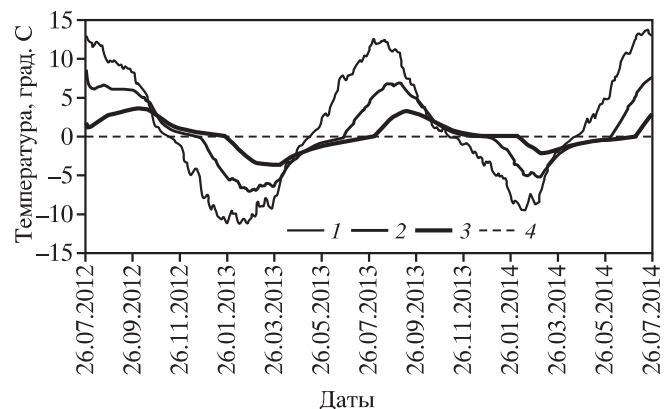


Рис. 5. Графики изменения температуры грунта в шурфе RU_04_Olkhon-Pit на глубинах: 1 – 0.50 м (среднегодовая температура +0.01 °С), 2 – 1.00 м (среднегодовая температура –0.31 °С), 3 – 1.50 м (среднегодовая температура –0.21 °С), 4 – 3.65 м (среднегодовая температура 0.00 °С).

снега, разреженная растительность и небольшая влажность грунта способствуют глубокому промерзанию пород. По данным температурных наблюдений, на глубине 3.65 м в среднегодовом исчислении круглогодичная температура – -0.03°C .

ВЛИЯНИЕ КРИОГЕНЕЗА НА РАЗВИТИЕ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ СТЕПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ

У южной границы криолитозоны формирование мерзлоты определяется в первую очередь ландшафтными и микроландшафтными условиями. При одинаковых климатических характеристиках и геологических условиях на близкорасположенных участках могут существовать немерзлые породы и одновременно формироваться или, наоборот, разрушаться массивы ММП. Незначительные по объему мерзлые участки имеют большое экологическое значение, влияя на состав растительного покрова, увеличивая или ослабляя динамику экзогенных процессов на склонах. Для данного типа мерзлых пород экологический фактор превалирует над климатическим. Изменения одних только климатических параметров недостаточно, чтобы вызвать формирование ММП. В этих случаях, согласно представлениям Ю.Л. Шура и М.Т. Йоргенсона [14], получает развитие “экосистемно обусловленная мерзлота” (ecosystem-driven permafrost).

Сплошное распространение деградировавшего кочкарника в верховьях долины (что характерно для всех долин исследуемой территории) и наличие хорошо выраженной полигональности свидетельствуют о более широком распространении в прошлом ММП. Деграция ММП на территориях могла быть связана как с климатическими изменениями, так и с антропогенным воздействием (выпас скота, распахивание земель). При этом грунты в днищах долин с малыми углами наклона сохраняли устойчивость. Устойчивость сохраняют и современные участки распространения ММП, располагающиеся в пределах склонов.

На территории изучаемой ложбины существующий кочкарник значительно деградировал. Это привело к направленному оттаиванию и формированию несливающейся мерзлоты, что было зафиксировано бурением. Полученные данные согласуются с наблюдениями Ф.Н. Лещикова и М.М. Шаца, показавшими, что участки с несливающейся мерзлотой, соответствующие этапу деграции мерзлых пород, достаточно широко распространены на территории южного Прибайкалья [6].

После оттаивания устойчивость грунтового массива значительно уменьшилась, вследствие чего началось медленное смещение пород деятельного слоя, которое проявилось в образовании субпараллельных трещин на поверхности днища ложбины и оперяющих трещин в нижней части бортов. Наблюдаемые деформации отражают *первую стадию* движения грунтового массива.

Начавшееся движение ускоряется и переходит во *вторую стадию* с образованием серии параллельных трещин отседания и просадок грунта; вслед за этим происходит дальнейшее оттаивание мерзлых пород, разгрузка грунтовых вод и ускорение движения грунтового материала в виде отдельных блоков.

Третья, наиболее динамичная, стадия реализуется в виде серии оползней разжижения-течения [9]. Судя по различной переработке поверхности, незначительному покрытию растительностью, наличию свежих следов течения и серии бортов, в недавнем прошлом наблюдалось не менее 2–3 циклов потоковых образований. После достижения критического состояния водонасыщенный слой мощностью ~ 2–3 м выплескивался вниз по долине. При этом разжиженный поток переносил значительные грунтовые блоки вместе с растительным и почвенным покровом, не разрушая их. Например, у самой кромки озера располагается блок верхней части днища ложбины с хорошо сохранившейся травянистой растительностью и кочкарником, его размеры 10×15 м, толщина 1.5–2.0 м, от места отрыва он отстоит на расстоянии около 100 м.

Значительная активность склоновых процессов, наблюдаемая на исследуемой территории, во многом обусловлена действием криогенного фактора. Формирование массивов ММП под увлажненными оторфованными участками днищ ложбин консолидирует грунтовый массив и обеспечивает ему относительную устойчивость. В период существования ММП формируется высокольдистый переходный горизонт. Деграция растительных и торфяных покровов, какими бы причинами она ни вызывалась, приводит к оттаиванию ММП и движению грунтовых масс. В этом случае наблюдаются две основные формы движений: 1) в виде медленно смещающегося по водонасыщенному горизонту верхнего сезонномерзлого слоя; 2) в виде водонасыщенных грунтовых потоков. Иногда медленное перемещение массива по мере ослабления связей переходит во вторую фазу и реализуется в виде потоков водонасыщенного грунта, перемещающего более плотные верх-

ние слои с растительным покровом на десятки метров вниз по склону.

На исследуемой территории видны многочисленные признаки иссушения увлажненных заторфованных участков. Это явление может быть связано как с потеплением климата, так и с усилением антропогенного воздействия, связанным с нерегулируемым выпасом домашнего скота и возросшей туристической активностью (многочисленные места стоянок, туристические тропы, неконтролируемый проезд автотранспорта). В силу особой чувствительности территории к внешним воздействиям эти факторы приводят к нарушению растительного покрова и, соответственно, к изменению температурного режима грунтов. Сходную картину можно наблюдать и в других районах южной границы криолитозоны. Так, на степных участках котловины о. Хубсугул на севере Монголии интенсивный выпас скота привел к деградации растительного покрова и последующему вытаиванию ММП. Отмечается, что на ненарушенных участках мощность слоя сезонного оттаивания ММП составляет 1.4 м. В местах интенсивного выпаса она увеличивается до 4.8 м, при этом начинается оттаивание мерзлых пород [1].

Следует отметить, что наряду с ложбинами, где распространены увлажненные заторфованные поверхности с ММП, имеются ложбины, где разрушение оторфованного горизонта и оттаивание пород уже произошли. Динамические процессы, связанные с оттаиванием мерзлых пород, остались в прошлом. Здесь на поверхности поросшей травянистой растительностью локально можно выделить остатки сухих кочкарников, оползневые уступы, заросшие и сглаженные потоковые формы.

На исследуемой территории около 30% склонов покрыты трещинами, ориентированными вдоль склона. Трещины проникают в грунт на 2–3 м, их ширина составляет 30–40 см, длина может достигать 10–15 м. Расстояние между трещинами варьируется от десятков сантиметров до 4 м. Иногда они образуют своеобразную лестницу, состоящую из ступеней высотой в несколько десятков сантиметров. Развитие данных форм рельефа связано с криогенным воздействием, но только не с многолетним, а сезонным. Значительная мощность деятельного слоя (более 3 м) обуславливает то, что практически в течение всего летнего сезона оттаявший слой подстилается мерзлым грунтом. При достижении определенной мощности, зависящей от состава пород и льдистости мерзлого горизонта, происходят подвижка грунтового блока и формирование серии трещин и уступов

на склоне. Сухой климат и малая увлажненность не способствуют перемещению грунтовых блоков на большое расстояние.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАБЛЮДАЕМЫХ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Проведенные исследования позволили разработать математические модели склоновых процессов, учитывающих специфические условия степных территорий о. Ольхон. Из методов локального прогнозирования оползневых процессов наиболее распространены инженерные методы расчета устойчивости оползневых склонов, которые дают возможность оценить коэффициент запаса их устойчивости. Такие методы можно отнести к экспресс-методам, известно достаточно большое их количество [10].

Сосредоточим свое внимание на расчете устойчивости склонов, смещение которых происходит по заданной поверхности скольжения, которые характерны для о. Ольхон.

Оползни течения. Рассмотрим задачу прогноза скорости оползания склона. Можно выделить несколько принципиальных схем механизма оползания толщи:

- “глубинное” течение – скорость изменяется от $V(h)$ до $V(0)$ (h – мощность оползающей толщи);
- движение оползающей толщи ($V = \text{const}$) мощностью h по тонкой прослойке, являющейся своеобразной “смазкой”;
- движение части оползающей толщи с переменной скоростью в плоском канале, ниже которого массив неподвижен, а выше либо движется со скоростью $V = \text{const}$, либо также неподвижен.

Очевидные аналогии этим схемам в природе – оползневые процессы, связанные с оттаиванием и промерзанием. Заметим также, что оползневые процессы отвечают за образование видимых на поверхности трещин закола.

При решении задач движения оползней и солифлюкционного течения склонов применяют уравнения гидромеханики. Как правило, для этой цели пользуются уравнениями движения вязкой жидкости Навье–Стокса и уравнениями неразрывности. При очень медленных движениях, как это имеет место в рассматриваемом случае, инерционными членами в уравнении Навье–Стокса можно пренебречь, что существенно его упро-

щает. Такие течения образуют так называемый класс “ползущих течений”.

Далее будем предполагать, что оползание склона происходит по плоской поверхности под действием гравитационных сил и, возможно, на оползающий слой также действует равномерно распределенная по всей его поверхности нагрузка. Будем считать, что при течении грунт несжимаем и скорость движения V зависит от глубины (координаты y), причем $V(0) = 0$. Тогда при сделанных предположениях из уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности следует, что скорость V будет определяться по формуле:

$$V(y) = -\frac{\gamma}{2\eta}y^2 \sin(\alpha) + Ay,$$

где γ – удельный вес оползающего грунта; η – коэффициент динамической вязкости оползающего грунта; α – угол наклона склона к горизонту; A – константа, которая может быть определена из дополнительных условий по скорости или из условий по касательным напряжениям.

Приведем окончательные выражения для определения скорости вязкого течения склона при наиболее часто используемых в инженерной практике условиях:

1. На свободной поверхности оползающего склона касательные напряжения отсутствуют:

$$V(y) = -\frac{\gamma}{2\eta}y^2 \sin(\alpha) + \frac{\gamma h}{\eta}y \sin(\alpha), \quad (1)$$

где h – глубина оползающего слоя.

2. На плоскости, по которой происходит течение, выполняется условие Кулона:

$$\tau_{xy} = c + p_0 \operatorname{tg}(\varphi).$$

Тогда

$$V(y) = -\frac{\gamma}{2\eta}y^2 \sin(\alpha) + \frac{c + p_0 \operatorname{tg}(\varphi)}{\eta}y, \quad (2)$$

где p_0 – напряжение, нормальное к плоскости, по которой происходит оползание склона; φ и c – параметры прочности по Кулону.

3. На поверхности текущего склона перемещения равны нулю, т.е. $V(h) = 0$:

$$V(y) = -\frac{\gamma}{2\eta}y^2 \sin(\alpha) + \frac{\gamma h}{2\eta}y \sin(\alpha), \quad (3)$$

где h – мощность текущего слоя.

Таким образом, в случаях (1) и (3) получаются классические зависимости, описывающие гравитационное плоскопараллельное движение вязкой жидкости.

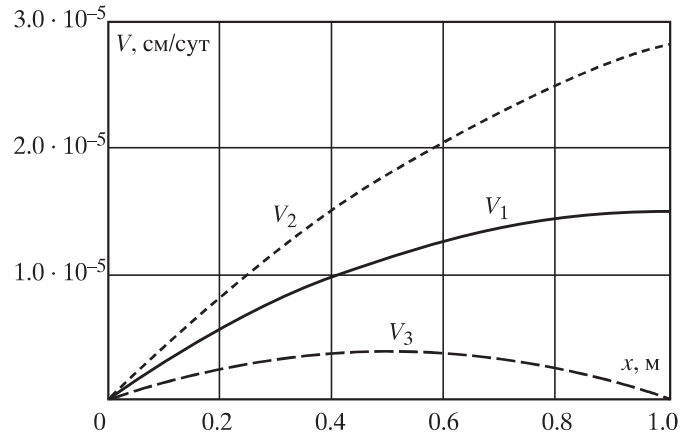


Рис. 6. Скорость течения: V_1 – зависимость (1); V_2 – зависимость (2); V_3 – зависимость (3).

В качестве примера приведем результаты расчетов (рис. 6), выполненных с использованием программы FoS-Way [4] и полученных при прогнозе оползания склона по разработанной программе.

Использовались следующие исходные данные: мощность слоя $h = 1$ м, угол наклона склона к горизонту $\alpha = 10^\circ$, коэффициент вязкости $\eta = 10^{13}$ Пуаз, угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, удельное сцепление $c = 0.005$ МПа, удельный вес $\gamma = 20\,000$ Н/м³, внешняя нагрузка $p_0 = 0$ МПа.

Простота полученных аналитических выражений и наличие реализующей их программы позволяют легко прогнозировать большое число вариантов, связанных с различными значениями исходных характеристик (α , h , γ , φ , c , η , p_0), и более обоснованно и с меньшими трудозатратами переходить (если это требуется) к решению численным методом уже достаточно сложной краевой задачи, связанной с проблемой укрепления склона.

Оползни скольжения. Для расчетов устойчивости часто используется модель Г.М. Шахуняца [12], позволяющая определять коэффициент устойчивости k_s как при круглоцилиндрической, так и при произвольной форме поверхности возможного смещения:

$$E_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left((N_i \operatorname{tg}(\varphi_i) + c_i l_i + T_{i,yd}) \frac{\cos(\varphi_i)}{\cos(\beta_i - \varphi_i)} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{i,сдв} \cos(\varphi_i)}{\cos(\beta_i - \varphi_i)} \right)}, \quad (4)$$

где n – количество отсеков, на которые разбивается блок возможного смещения; φ_i – угол внутреннего трения грунта по основанию i -го отсека,

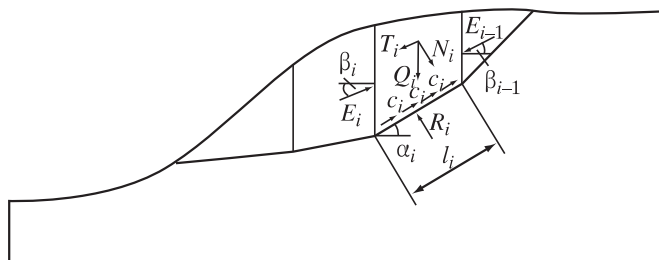


Рис. 7. Схема к расчету устойчивости оползневого склона методом прислоненного откоса.

град; c_i – удельное сцепление грунта по основанию i -го отсека; l_i – длина поверхности смещения в пределах отсека; β_i – угол наклона к горизонту поверхности смещения i -го отсека (в пределах отсека, если поверхность возможного смещения криволинейна, она заменяется плоской поверхностью, т.е. прямой на чертеже); $N_i = Q_i \cos(\beta_i)$ и $T_i = Q_i \sin(\beta_i)$ – нормальная и тангенциальная составляющие веса $Q_i = e_{j=1}^m \omega_j \gamma_j$ для i -го отсека; m – количество инженерно-геологических элементов (ИГЭ), содержащихся в данном отсеке; ω_j – площадь, занимаемая в данном отсеке j -м ИГЭ; γ_j – удельный вес грунта j -го ИГЭ; $T_i = T_{i-сдв}$ при $\beta_i (+)$ – направление в сторону сдвига; $T_i = T_{i-уд}$ при $\beta_i (-)$ – направление в сторону удержания отсека.

Скольжение оползневого тела по произвольной ломаной линии, предопределенной геологическим строением, может быть проанализировано с использованием метода “прислоненного откоса” [12].

На вертикальные грани отсека вследствие воздействия соседних отсеков приложены силы оползневых давлений E_{i-1} и E_i , направленные под углами α_{i-1} и α_i от нормалей к граням отсека (рис. 7).

$$E_i = \frac{(k_s T_i - N_i \operatorname{tg}(\varphi_i) - c_i l_i) \cos(\varphi_i)}{\cos(\beta_i - \alpha_i - \varphi_i)} + E_{i-1} \frac{\cos(\beta_i - \alpha_{i-1} - \varphi_i)}{\cos(\beta_i - \alpha_i - \varphi_i)}. \quad (5)$$

Вычисления оползневых давлений производят последовательно, начиная с верхнего отсека, для которого $E_{i-1} = 0$. Коэффициент запаса устойчивости определяют подбором таким образом, чтобы оползневое давление самого нижнего отсека E_n оказалось равным 0. Углы α_i и α_{i-1} принимаются равными 0, когда силами взаимодействия между отсеками можно пренебречь, или приравнивают их углам внутреннего трения грунтов соответствующих отсеков. Метод “прислоненного откоса” позволяет сравнительно просто определить

величину оползневого давления в любом сечении оползневого тела, что оказывается полезным при проектировании противооползневых мероприятий.

Зная положение в оползневом теле уровня подземных вод, можно учесть их взвешивающее влияние и фильтрационное давление. Следует отметить, что вследствие образования трещин закола возможно сокращение длины поверхности скольжения и, соответственно, уменьшение сил сопротивления сдвигу. Глубина трещины h_f может быть определена по формуле В.В.Соколовского [8]:

$$h_f = \frac{2c \cos(\varphi)}{\gamma(1 - \sin(\varphi))}. \quad (6)$$

Эта зависимость также позволяет оценить месторасположение закола на поверхности скольжения.

Рассмотренные в статье методы расчетов скорости течения склонов и их устойчивости не позволяют прогнозировать во времени их напряженно-деформированное состояние и потерю устойчивости. Они дают возможность только качественной оценки состояния склона при возможных вариациях механических характеристик грунтов склона. Однако такие возможности предоставляют численные методы моделирования, с помощью которых можно проводить расчеты, учитывающие в совокупности процессы фильтрации и деформирования, вплоть до потери устойчивости склонов, с учетом температурных воздействий, что чрезвычайно важно для районов распространения ММП.

ВЫВОДЫ

На исследуемой территории формирование и деградация современных ММП определяются микроландшафтными условиями, обуславливающими возможность формирования или разрушения мохового покрова. Выявлены два типа ММП: непрерывная, связанная с развитием увлажненных оторфованных кочкарников, и несливающаяся, формирующаяся на участках деградирующих кочкарников. Деградация мохового слоя связана как с природными, так и с антропогенными воздействиями.

Значительная активность склоновых процессов, наблюдаемая на исследуемой территории, во многом обусловлена действием криогенного фактора. Формирование массивов ММП под увлажненными оторфованными участками днищ ложбин консолидирует грунтовый массив и обеспечивает ему относительную устойчивость. Де-

градация растительных покровов приводит к оттаиванию ММП и движению грунтовых потоков. Наблюдаются две основные формы движений потоков в виде:

- медленно смещающегося (первые сантиметры в год) по водонасыщенному горизонту верхнего сезонномерзлого слоя;
- грунтовых блоков, перемещающихся текучей водонасыщенной грунтовой массой (до нескольких метров в год).

Иногда медленное смещение грунтового массива по мере ослабления связей реализуется в виде потоков водонасыщенного грунта, перемещающих более плотные верхние слои с растительным покровом на десятки метров вниз по склону.

Проведенный годичный цикл температурных наблюдений позволил установить параметры и значения температурного режима деятельного слоя. Выявленная мощность деятельного слоя 3.65 м, что значительно превышает зафиксированные ранее данные (2.8 м на метеостанции Узур) [11]. Оттаивание сезонномерзлого слоя происходит до первой декады ноября, когда верхний слой грунтов уже начинает промерзать. Длительный период оттаивания обуславливает скольжение грунтовых блоков по мерзлому основанию. Это приводит к широкому распространению трещин в породах сезонноталого слоя на склонах.

Рассмотренные методы расчетов скорости течения склонов и их устойчивости являются квазистатическими и статическими. Поэтому возникает необходимость развития и использования численного моделирования при изучении склоновых процессов на участках распространения современных ММП, которые дают возможность не только качественной оценки состояния склона, но и позволяют проводить расчеты в динамике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баастын Оюунгэрэл*. Эколого-географические основы функционирования и перспективы развития особо охраняемых территорий Северной Монголии // Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Улан Удэ. 2011. 48 с.
2. *Баженова О.И.* Современная денудация в островных степях Сибири // Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Томск, 2011. 42 с.
3. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Йошикава К., Чиждова Ю.Н., Станиловская Ю.В.* Миграционные бугры пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири // Инж. геолог. 2013. № 3. С.14-34.
4. *Власов А.Н., Мнушкин М.Г.* Программный комплекс "FoS-Way" // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617926. Выдано Федеральной службой интеллектуальной собственности 20 января 2012 г.
5. *Лециков Ф.Н., Зарубин Н.Е.* Геокриологические условия Прибайкалья // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М.: Наука, 1967. С. 51–70.
6. *Лециков Ф.Н., Шац М.М.* Мерзлые породы юга Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.
7. *Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др.* Кайнозой Байкальской рифтовой долины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "ГЕО", 2001. 252 с.
8. Оползни и сели. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1984. Т. 1. 352 с.
9. *Постоев Г.П.* Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.-СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
10. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициентов устойчивости склона и оползневого давления. М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986. 124 с.
11. *Трофимова И.Е.* Современное состояние и тенденции многолетних изменений мерзлотно-термического режима почв Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 38–45.
12. *Шахунянц Г.М.* Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
13. <http://www.maps.google.com>, дата съемки 04.10.2013, дата обращения 20.09.2014.
14. *Shur Y.L., Jorgenson M.T.* Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // Permafrost and Periglacial Process. 2007. № 18. P. 7–19.

INFLUENCE OF CRYOGENESIS ON SLOPE PROCESSES IN STEPPE AREAS OF CISBAIKAL REGION (by the example of Olkhon Island)

A. N. Khimenkov*, **A. N. Vlasov*****, **D. O. Sergeev***, **E. A. Kozyreva*****,
A. A. Rybchenko***, **V. A. Pellinen*****

**Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: cryo@geoenv.ru*

***Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Leningradskii pr. 7, Moscow, 125040
Russia. E-mail: bah1955@yandex.ru*

****Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Lermontova 128, Irkutsk, 664033 Russia. E-mail: kozireva@crust.irk.ru*

The results of complex geocryological investigations in the desert-steppe landscape of Olkhon Island are presented. The new data of field geocryological observations and remote sensing have been obtained. They indicate the influence of cryogenic factor on the slope movements. The results of automatic hourly temperature measurements in the pit have been analyzed. The leading role of microlandscape variability in permafrost evolution is shown. The methods of slope stability estimation taking into account the geological conditions and mechanism of landslide development are proposed.

Keywords: *sporadic permafrost, arid climate, cryogenic factor, landslides.*