

МЕХАНИЗМ СЕЙСМОГЕННЫХ ОПОЛЗНЕЙ РАЗЖИЖЕНИЯ

Кыргызстан как высокогорная страна уязвим в отношении стихийных бедствий, в особенности, вызываемых эндогенными и экзогенными геологическими процессами. К числу наиболее опасных из них относятся оползни, так как на их долю приходится наибольшее количество погибших (254 жертвы за 1988-2010 гг.), далее в порядке убывания среди геологических катастроф следуют землетрясения (132 жертвы).

Наибольшую опасность среди гравитационных смещений масс на горных склонах представляют собой сейсмогенные оползни, которые возникают при сильных землетрясениях, особенно происходящих в зоне Памиро-Гиндукуша /1/. Сопоставление времени проявления ощутимых ($M > 4,5$) землетрясений Памиро-Гиндукушской зоны со временем возникновения крупных оползней, зафиксированных в период 1969-2010 гг. на кыргызской части территории Тянь-Шаня, показало, что подавляющую часть из восьмидесяти сейсмосинхронных оползней составляют оползни разжижения и оползни-потоки, затем по повторяемости следует реактивизация древних оползней, и, наконец, выявлены сейсмогенные блоковые оползни, приуроченные к зонам активных тектонических разломов /2/.

Глубокофокусные Гиндукушские землетрясения в горах Тянь-Шаня проявляются в виде низкочастотных и продолжительных по времени ($t > 1,5-2$ мин.) сейсмических колебаний, которые в весеннее время на обводненных склонах могут вызывать разжижение суглинисто-песчаных грунтов, сейсмопросадку лессов и возникновение оползней-потоков с большой дальностью распространения.

Оползни-потоки составляют две трети от общего числа всех обследованных оползней на территории Кыргызстана. К числу наиболее катастрофичных оползней этого типа, вызвавших гибель 182 человек, относятся следующие: Калдарбай (1973), Сары-Булак (Кок-Жангак, 1976), Кайнар-Булак (1988), Алтынкурек (1988), Кум-Шоро (1988), Жалгыз-Алча (1991), Кара-Таш (1993), Тосой (1994), Комсомол (1994), Кара-Сөгёт (2003), Кайнама (2004), Кёлмё-Сай (2006), Райкомол (2009).

Под разжижением понимается явление полной или частичной потери грунтом несущей способности под влиянием динамической (например, сейсмической) нагрузки и переход его в текучее состояние, возникающее в результате разрушения структуры грунта. Основной механизм разжижения,

рассматриваемый в механике грунтов как фильтрационное деформирование грунта, – это увеличение порового давления и, как следствие, уменьшение эффективных напряжений. В водонасыщенном массиве грунтов поровая вода (флюиды) в той или иной мере может оказывать на минеральный скелет взвешивающее действие и фильтрационное давление разной направленности, вызываемое фильтрационными объемными силами. Разжижение грунта может произойти во время землетрясения потому что при прохождении сейсмической волны частицы грунта начинают колебаться с разными скоростями и часть контактов между ними разрывается, в результате грунт может стать на время водой с взвешенными в ней песчинками. Вода стремится отжаться, но прежде чем грунт вернется к первоначальному состоянию, сильно обводненные склоны могут обрушиться.

К числу сейсмогенных оползней разжижения, вызванных Гиндукушскими землетрясениями, относится оползень Сары-Булак, сформировавшийся северо-западнее г. Кок-Жангак (рис. 1). Первые оползневые трещины протяженностью по 100-120 м и глубиной до 3 м возникли в головной части оползня в конце февраля 1974 г. Есть основания предположить, что эти сейсмопросадочные трещины образовались после землетрясения с магнитудой $M=5,4$, произошедшего 22 февраля в зоне Памиро-Гиндукуша на глубине 116 км. Ниже трещин лёссовидные грунты просели на 0,5-1,0 м.

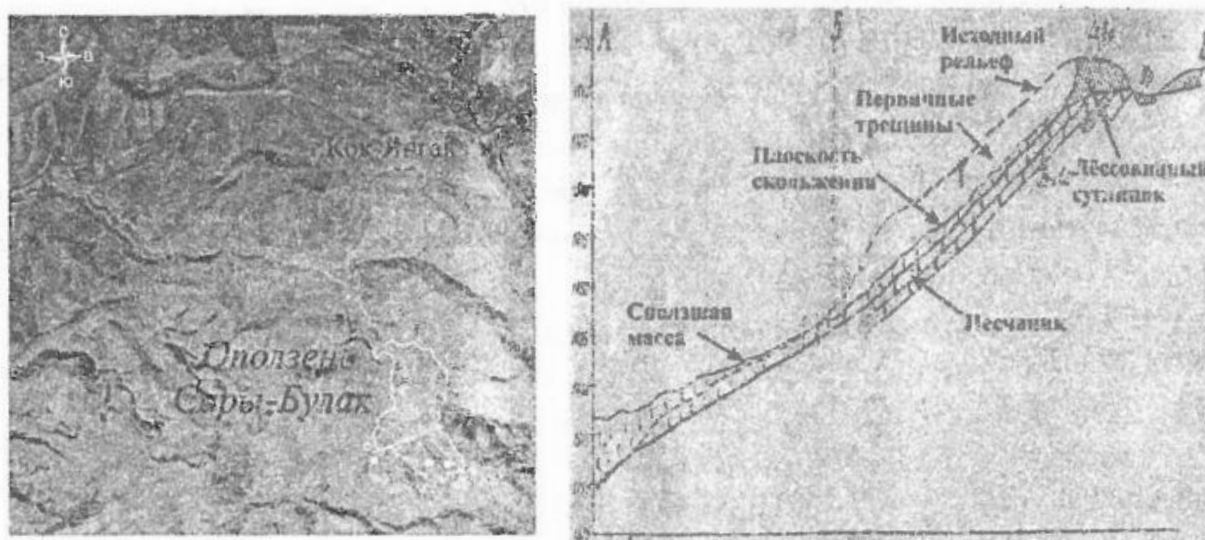


Рис.1. Оползень Сары-Булак в районе города Кок-Янгак

Оползень Сары-Булак возник в лёссовидных суглинках со средней мощностью 20 м (рис. 1). В геоморфологическом отношении оползневой участок характеризуется сильно расчлененностью рельефа, где уклоны поверхности варьируют в интервале от $12-14^\circ$ до 30° . К числу особенностей геолого-

тектонического строения района оползня относится наличие здесь тектонических нарушений, отдельные из которых оконтуривают участок с востока, а другие имеют место непосредственно в пределах оползневого участка.

Гидрогеологические особенности оползневого участка во многом предопределяются характером водоносных горизонтов и комплексов, сформировавшихся в юрских отложениях. Подземные воды, приуроченные к ним, имеют напорный характер и трещинно-пластовый тип циркуляции. Разгрузка их во многом обусловлена наличием разломов, непосредственно на участке оползня прикрытых четвертичными отложениями. Дебиты родников, приуроченных к этим водоносным горизонтам, составляли 0,3-2,0 л/с. Важную роль при разгрузке напорных вод юрских водоносных горизонтов сыграло наличие углового несогласия между отложениями юры и четвертичного возраста. Разгрузка подземных вод по этому контакту, обеспечив значительное увлажнение, привела к снижению прочностных параметров пород приконтактной части как подстилающих юрских образований, так и покрывающих их суглинков до предельных их значений и способствовала формированию своеобразной сильно увлажненной зоны скольжения, которая в сочетании с отмеченными уклонами контакта и рельефа привела к возникновению оползня Сары-Булак. Таким образом, основной причиной снижения устойчивости склона явились подземные воды, уровень которых, по данным мониторинга, постоянно поднимался, начиная с 1969 г.

Мониторинг оползневых смещений на реперах, установленных на первоначальных трещинах, показал, что в 1974-1975 гг. расстояния между этими реперами практически не изменялись, за исключением небольших (4-6 см) подвижек в весенние периоды. Весной 1976 г., начиная с апреля, были зафиксированы подвижки, которые вплоть до основного смещения носили нерегулярный характер, когда медленные (1,7-2,0 мм/сутки) или быстрые (8-10 мм/сутки) смещения сменялись перерывами в движении продолжительностью от 10 до 30 дней, а общая величина подвижек с апреля до катастрофической разгрузки оползня 27 ноября 1976 г. составила 0,5 м.

Разгрузка оползня Сары-Булак, скорее всего, была спровоцирована землетрясением с магнитудой $M=6,1$, произошедшим 27 ноября 1976 г в Гиндукуше, на глубине 190 км. Следует отметить, что подавляющее число оползней и оползневых смещений в рассматриваемом районе происходит в весенние месяцы. Сход оползневых масс произошел следующим образом: сначала с шумом и с большой скоростью сползла левая часть склона, которая прошла по днищу ручья Сары-Булак на расстояние более 1 км (рис. 1). О высокой скорости оползневого потока свидетельствует тот факт, что женщина и ребенок,

находившиеся в момент обрушения на расстоянии 700 м от стенки отрыва, не успели отбежать на безопасный участок склона и оказались погребенными под оползнем. Объем первоначально сошедшей оползневой массы составил 2,5 млн м³. Второе смещение, уже в центральной части склона ниже первичных трещин, произошло спустя 3 часа после первого. Оползневые массы мгновенно распространились по дну сая, заполняя на склон в местах его изгиба, разрушая на пути своего движения все постройки. Общий объем сползшей массы достиг 4,5 млн м³, а сами оползни сразу после схода представляли собой кашеобразную, увлажненную массу повышенной текучести. Общая протяженность оползневого потока на 9 декабря 1976 г. составила 4,5 км (рис. 1), при этом за первый день он продвинулся на 2 км, а в последующие два дня (28-29 ноября) еще на 2 км; с 30 ноября по 9 декабря – еще на 0,5 км. К августу 1977 г. общий объем смещенной массы достиг 8 млн м³.

Чрезвычайно большая дальность распространения оползневых масс, превышающая 4,5 км, объясняется не только крутым уклоном тальвега ручья Сары-Булак, но и разжижением лессовидных суглинков в зоне скольжения, вызванным сейсмическими колебаниями значительной продолжительности от Гиндукушского землетрясения 27 ноября 1976 г. О том, что произошло разжижение суглинков именно в зоне скольжения, свидетельствуют следующие факты: во время основного смещения наблюдался столб пыли, а сразу после смещения, по свидетельству очевидцев, появились фонтаны воды, которые через некоторое время исчезли. Отмечается также, что поверхностная толща оползневых масс находилась в слабо влажном, даже сухом состоянии. После смещения оползня у подножья стенки отрыва обнажились выходы подземных вод, а на поверхности оползневого потока, в понижениях, появились небольшие водоемы, которые постепенно увеличивались в размерах.

В результате геотехнических исследований и испытаний лессовидных суглинков, отобранных из трех скважин (рис. 1) глубиной до 25 м, были получены следующие результаты. По гранулометрическому составу грунты оползневого склона относятся к пылеватым суглинкам: установлено, что содержание пылеватых фракций с размером частиц 0,005–0,05 мм составляет 71,9–85,7%, песчаной фракции – от 3 до 10 % (при этом преобладают частицы размером 0,5–0,05 мм), содержание глинистых частиц размером меньше 0,005 мм варьирует от 11,3 до 18,1 %. Удельный вес составляет 2,67–2,71 г/см³. Естественная влажность суглинков изменяется по глубине сверху вниз от 7,7 до 30,2 %. Предел пластичности изменяется в диапазоне от 27,6 до 35,4 %, предел текучести – от 18,8 до 23,9 %, индекс пластичности – от 8,8 до 16 %. Пористость в среднем составляет 52 %, что предопределяет их значительную просадочность, которая проявилась на склоне весной 1974 г. Содержание карбонатов находится

в пределах 20-25 %. Прочностные параметры грунтов определялись при естественной влажности и в замоченном состоянии. Установлено, что эффективный угол внутреннего трения (ϕ') в насыщенном состоянии изменялся от $23,3^\circ$ до $26,1^\circ$, а эффективное сцепление (C') – от 5 до 10 кПа. По классификации грунтов Казагранде лессовидные суглинки представляют собой глинистый ил (CL) неорганического происхождения (рис. 2).

Результаты геотехнических испытаний свидетельствуют о том, что описываемый грунт имеет типичные характеристики лессовых пород и может рассматриваться как метастабильный материал, способный к обрушению при определенных условиях на месте. В частности, сильно водонасыщенный лессовидный суглинок может оказаться разжиженным в результате колебаний в ходе землетрясения по причине циклической нагрузки, вызванной восходящим распространением сдвиговых сейсмических волн. Для оценки потенциала разжижаемости лессовидных суглинков, слагающих тело оползня Сары-Булак, на основе полученных результатов геотехнических испытаний была построена диаграмма пластичности для оценки разных типов грунтов, отобранных в оползнеопасных районах Кок-Жангака, Таран-Базара и Майлуу-Суу. Диаграмма представлена на рис. 2 и дает основания считать грунты в окрестностях Кок-Жангака и Таран-Базара как попадающие в пределы зоны потенциального разжижения.

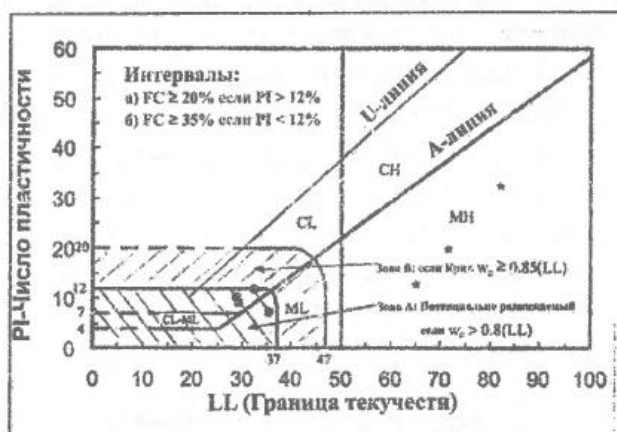


Рис. 2. Диаграмма пластичности для образцов грунта оползневых склонов в Кок-Янгаке, Таран-Базаре (o) и Майлуу-Суу (*)

Для оценки фактической разжижаемости грунтов на разных глубинах залегания была использована методика, базирующаяся на сопоставлении средних напряжений сдвига, вызываемых землетрясением, с напряжениями, вызывающими разжижение грунтов на той или иной глубине.

Средние напряжения сдвига, вызванные землетрясением (τ_{av}), были вычислены с использованием следующей формулы:

$$\tau_{av} = \frac{0,65 \cdot \gamma \cdot h \cdot a_{max}}{g \cdot R_d},$$

где γh – общие нормальные напряжения на рассматриваемой глубине; a_{max} – максимальные ускорения грунта, ожидаемые в районе: $a_{max}=0,2$ g для Кок-Жангака и 0,15 g для Таран-Базара, g – ускорение свободного падения; R_d – фактор участия нелинейных сдвигов.

Напряжения, вызывающие разжижение, были вычислены с использованием следующей формулы:

$$\tau_l = \frac{\sigma'_{vo} \cdot \sigma_{dc} * c_r \cdot D_r}{2 \cdot \sigma_a \cdot 50},$$

где σ'_{vo} – вертикальные эффективные напряжения; $\sigma_{dc}/2 \sigma_a$ – коэффициент напряжений, вызывающий разжижение и зависящий от магнитуды землетрясений, выраженный в виде выделяющихся циклов напряжений (N_c) и среднего размера зерна (D_{50}) в массиве. Для магнитуды $M=7$, $N_c = 10$ циклам и принимая $D_{50} = 0,03$ мм, коэффициент напряжений равен 0,200; D_r – относительная плотность материала, принятая равной 40%; c_r – поправочный фактор для относительной плотности материала, для $D_r < 50\%$, $c_r = 0,57$.

После вычислений и графического оформления результатов (рис. 3) стало очевидным, что водонасыщенный материал с приведенными выше свойствами является потенциально разжижаемым до глубины 10 м в Таран-Базаре и до глубины в 30 м в Кок-Жангаке, в том числе для участка оползня Сары-Булак.

Оценка устойчивости оползнеопасного склона была выполнена с использованием компьютерной программы SLIDE 4.0. Расчеты применительно к различным условиям моделирования (сочетания влажности, уровня подземных вод, сейсмической нагрузки) показали, что для зафиксированного в момент оползания уровня подземных вод запас устойчивости достигает критического значения ($K_{уст} = 1,0$). В этом случае воздействие сейсмических колебаний с длительностью, характерной для Гиндукушских землетрясений ($t > 1,5-2$ мин) резко снижает $K_{уст}$, что и вызвало обрушение склона в Сары-Булаке, то есть землетрясение стало спусковым (триггерным) механизмом оползания склона.

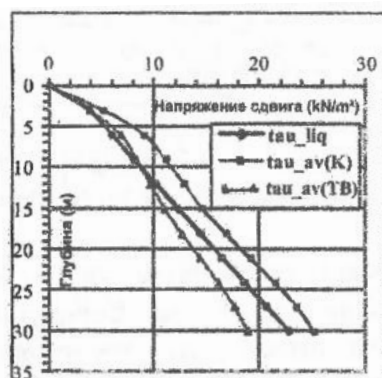


Рис. 3. Потенциал разжижения лессовидных суглинков, отобранных с различных глубин оползня Сары-Булак (К) в Кок-Янгаке и оползня Таран-Базар (ТБ)

Одной из причин сверхдальнего распространения оползневых масс в сочетании с разжижением стало то, что массы сухих приповерхностных суглинков при столкновении с правым бортом сая (рис. 1) потеряли свою структуру, раздробились, приняв вид пульпообразного порошка. Одновременно при ударе о борт сая эти массы получили мощный динамический толчок, который способствовал их дальнейшему продвижению со значительной скоростью на большое расстояние по руслу сая.

Список литературы

1. Ниязов Р.А. Оползни Узбекистана (тенденции развития на рубеже XXI века). – Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2009. – 208 с.
2. Torgoev I., Nijazov R., Havenith H.-B. Tien-Shan landslides triggered by earthquakes in Pamir-Hindukush zone // Proceedings of the second world landslide forum. Roma, 2011 (in Press).