Г. И. ТЕР-СТЕПАНЯН

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ГЛУБИННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СКЛОНОВ

Поверхностная ползучесть склонов

Уже давно было замечено, что на многих склонах под действием силы тяжести происходят медленные перемещения поверхностного плаща. Впервые на такие движения обратил внимание Де-ла Беш более 130 лет назад. Однако, эти движения долго оставались не изученными, и их геоморфологическое значение было установлено только спустя 60 лет Альбрехтом Пенком, а несколькими годами позже Девис изучил эти движения и дал им обобщенное толкование.

Геоморфологическое изучение этих движений оказалось очень плодотворным. На рубеже прошлого и настоящего веков были проведены обширные работы, вначале главным образом в полярных странах; первые работы принадлежат Девисону. В ряде полярных стран—Шпицберген, Скандинавия, Исландия, Фолклендские и Медвежьи острова—были изучены перемещения рыхлых отложений на склонах под влиянием сезонного промерзания и оттаивания,—так называемая полярная солифлюкция.

В дальнейшем эти исследования были осуществлены в иных климатических условиях—от Венского леса до южно-африканских просторов, Приполярного Урала и горных склонов северной Суматры, от Карпат до Аппалачского плато и тропических лесов Бразилии. Во всех этих случаях был установлен факт медленных движений, механизм которых весьма различен.

Для обозначения этих движений в полярных странах Девисон применил в 1889 году английский термин крип (сгеер), т. е. ползучесть. По мере обнаружения аналогичных движений в других условиях, содержание термина стало расширяться, и в настоящее время под этим названием описываются медленные движения горных пород на склонах, происходящие под влиянием силы тяжести и ряда сопутствующих факторов—сезонного увлажнения и высыхания, нагревания и охлаждения, замерзания и оттаивания, роста корней и деятельности животных и др. Роль этих движений была убедительно показана В. Пенком; их дифференциация была дана Шарпом. Терцаги называет эти движения сезонной или поверхностной ползучестью. Этот последний термин — **поверхностная ползучесть**—кажется более правильным.

Среди движений, происходящих в верхнем слое грунта, имеет смысл выделить собственно солифлюкцию, обозначая этим термином движения, связанные с отделением частичек грунта от общего массива, их свободном перемещением под влиянием тех или иных факторов и отложе-

нием. Такие движения, происходящие в самом верхнем слое, приближаются по своему характеру к сносу; в реологическом отношении они резко противопоставляются движениям ползучести, происходящим в расположенных под ними слоях грунта. Одним из проявлений собственно солифлюкции является образование аккумулятивных гряд. Так называются вытянутые по простиранию склонов скопления рыхлого материала, образующиеся вдоль препятствий—дорог, межей и т. д.

С глубиной скорость поверхностной ползучести убывает; на крутых склонах она выше, чем на пологих. Внешние проявления поверхностной ползучести различны—наклон молодых деревьев, саблеобразный изгиб старых деревьев, разрушение подпорных стенок, загиб голов пластов и др.

Геологические предпосылки теории глубинной ползучести склонов

Медленные движения горных пород происходят не только на поверхности грунта, но и в более глубоких зонах. Изучение этих движений позволило разработать теорию глубинной ползучести склонов, которая в состоянии объяснить многие явления, происходящие на склонах. Эта теория основывается на ряде предпосылок, которые удобно подразделить на геологические и реологические.

Имеются многочисленные геологические данные, показывающие, что горные породы, слагающие склоны, не всегда являются неподвижными и во многих случаях они подвержены медленным гравитационным движениям без нарушения их сплошности; в большинстве случаев оползни не происходят внезапно, но им предшествует период медленных подготовительных движений, длительность которых колеблется в широких пределах—от нескольких дней до многих лет. Скорость этих движений подвержена большим изменениям, смещения пород на склонах порой прекращаются и вновь возобновляются. Во всех случаях эти движения сильно ускоряются перед началом обрушения склона. Иногда эти движения продолжаются и после имевшего место оползня.

Терцаги дал первый обобщенный анализ этих движений; он называет их непрерывной или массовой ползучестью. Большой вклад в развитие теории глубинной ползучести был сделан учеными, наблюдавшими и анализировавшими различные вопросы медленных движений склонов в начальной фазе оползания. Среди них должны быть названы имена Гейма, Амферера, Штини, Маслова, Попова, Терцаги, Хефели, Шахунянца, Гольдштейна, Мюллера, Заруба, Пашека, Пальшина, Емельяновой и др.

Изучение хода развития многочисленных оползней (по литературным данным, преимущественно по первоисточникам) показало, что такие предварительные движения предшествуют почти всем оползням, происходящим в самых различных геологических и климатических условиях. Исключением являются оползни, возникающие вследствие зем-

летрясений и внезапного разжижения песков под действием сотрясений.

Наиболее яркими примерами являются крупнейший оползень 1806 г. горы Россберг у Гольдау в Швейцарии, который готовился в течение почти 30 лет; затем другой очень крупный оползень 1903 г. горы Тертл у Френка в Канаде, где за 7 месяцев до того в руднике происходили сотрясения и сильные обвалы; знаменитые оползни Панамского канала у Кукарача в 1905—1911 годах; крупные оползни на правом берегу Волги у Ульяновска, Саратова, Горького и др. Классическим примером медленно готовящихся оползней являются Одесские оползни и близкие к ним по своему механизму оползни Уоррен близ Фолкстона в Южной Англии. Наконец, многие склоны постоянно находятся в медленном движении. Одним из них является Дзорагетский оползень в Армении, обнаруживающий смещения со скоростью около 2 см в год.

Реологические предпосылки теории глубинной ползучести склонов

Известно, что обрушение склонов происходит, когда сопротивление грунта сдвигу по потенциальной поверхности скольжения оказывается недостаточным. Свойство сопротивления грунтов сдвигу являются очень сложными и еще недостаточно изученными. Для возможности математической интерпретации происходящих на склоне явлений можно прибегнуть к аппроксимациям, опирающимся на экспериментальные данные и имеющим в своей основе теорию эффективных напряжений.

Вид и интенсивность деформации сдвига определяются значениями коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу $\operatorname{tg} \vartheta$, представляющего собой отношение касательных напряжений τ , действующих на площадку деформирования, к величине приведенных эффективных нормальных напряжений $\sigma_0 + \sigma'$, действующих на ту же площадку

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\tau}{\sigma_0 + \sigma'} = \frac{\tau}{\sigma + \sigma - u}, \quad (1)$$

где $\sigma_0 = c' \operatorname{ctg} \varphi'$,

c' и φ' — параметры сопротивления сдвигу τ_f , выраженному через эффективные напряжения, $\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$,

σ — нормальные напряжения, действующие на площадку деформирования и u — поровое давление.

Скорость относительной деформации сдвига $\dot{\gamma}$ зависит от величины избытка $\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \vartheta_0$ мобилизованного сопротивления сдвигу над некоторым условным порогом ползучести $\operatorname{tg} \vartheta_0$; он представляет то наибольшее значение коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу, при

котором еще не происходит длительных деформаций, $\operatorname{tg} \vartheta_0 = \frac{\tau_0}{\sigma_0 + \sigma}$; здесь

σ_0 является предельным напряжением сдвига.

При небольшой длительности действия касательных напряжений, в зависимости от значения коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу, грунт может находиться в одной из трех фаз: 1) фаза же-

сткости, при $0 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\vartheta_0$; здесь длительных деформаций не происходит; 2) фаза ползучести, при $\operatorname{tg}\vartheta_0 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\varphi'$; здесь происходят длительные деформации; 3) фаза пластичности, при $\operatorname{tg}\vartheta = \operatorname{tg}\varphi'$; здесь происходит срез.

Процесс ползучести не может длиться бесконечно; при большой длительности действия касательных напряжений, ползучесть либо постепенно затухает, либо же ускоряется; в первом случае фаза ползучести переходит в фазу жесткости, а во втором случае завершается срезом, т. е. процесс переходит в фазу пластичности. Критерием, которым определяется протекание процесса в сторону затухания или ускорения, является второй порог ползучести $\operatorname{tg}\vartheta_2$. Он представляет собой то значение коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу, при котором процесс неопределенно долго находится в фазе ползучести.

При очень большой длительности процесса большое значение обретают чрезвычайно медленные деформации, так называемая вековая ползучесть, которые происходят в области между первым порогом ползучести $\operatorname{tg}\vartheta_1$ и величиной $\operatorname{tg}\vartheta_0$.

Таким образом, при большой длительности действия касательных напряжений, в зависимости от значения коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу, грунт может находиться в одной из следующих пяти фаз:

1) фаза жесткости, при $0 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\vartheta_1$; здесь деформации не происходят;

2) фаза вековой ползучести, при $\operatorname{tg}\vartheta_1 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\vartheta_0$, здесь деформации протекают чрезвычайно медленно и проявляются только за геологическое время;

3) фаза затухающей ползучести, при $\operatorname{tg}\vartheta_0 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\vartheta_2$; здесь деформации происходят с уменьшающейся скоростью, и постепенно процесс переходит в фазу вековой ползучести;

4) фаза ускоряющейся ползучести, при $\operatorname{tg}\vartheta_2 < \operatorname{tg}\vartheta < \operatorname{tg}\varphi'$; здесь деформации происходят с увеличивающейся скоростью, и постепенно процесс переходит в фазу пластичности;

5) фаза пластичности, при $\operatorname{tg}\vartheta = \operatorname{tg}\varphi'$; здесь происходит срез или обрушение.

В фазе пластичности развивается пиковое сопротивление грунта, которое в процессе дальнейшего деформирования постепенно уменьшается и достигает своего постоянного значения; его роль в длительной устойчивости склонов была показана Скемптоном.

Теория глубинной ползучести склонов

Теорию глубинной ползучести склонов вкратце можно сформулировать следующим образом: тело склонов находится в особом напряженном состоянии. Концентрация напряжений, вызванная существованием откоса, представляет собой чисто местное явление, влияние которого быстро убывает как в глубину, так и в горизонтальном направлении. Имеется однозначная связь между напряженным состоянием и мо-

близованным сопротивлением сдвигу—тангенсы наибольших углов отклонения равняются коэффициентам мобилизованного сопротивления сдвигу; поэтому сопротивление сдвигу в различных точках грунтового массива, слагающего склоны, мобилизуется неравномерно, в зависимости от статических условий и геолого-гидрогеологической обстановки. Во всех тех точках грунтового массива, в которых коэффициент мобилизованного сопротивления сдвигу меньше первого порога ползучести, должно быть фаза жесткости, т. е. грунт не обнаруживает длительных деформаций.

В тех точках массива, в которых мобилизовано большее сопротивление сдвигу, чем этот порог, но меньшее, чем полное сопротивление сдвигу, должна происходить длительная деформация ползучести по потенциальной площадке скольжения, причем скорость деформации увеличивается вместе с увеличением избытка коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу над порогом ползучести. В зависимости от величины мобилизованного сопротивления сдвигу возникают области вековой ползучести (имеющей значение для твердых и полутвердых скальных пород при геологической длительности процесса), замедляющейся ползучести (имеющей значение для мягких пород в фазе подготовки оползания) и ускоряющейся ползучести.

В тех точках массива, в которых мобилизовано все сопротивление сдвига, происходит срез грунта. Такие точки массива обычно занимают небольшие островоподобные участки, расположенные в центральных частях потенциальной поверхности скольжения склона.

Вследствие падения сопротивления грунта от пикового к остаточному значению, происходит перераспределение касательных напряжений, островообразные области пластичности расширяются и в процесс прежде всего вовлекаются соседние участки, находившиеся в фазе ускоряющейся ползучести. Так как суммарная касательная сила, действующая вдоль потенциальной поверхности скольжения, не должна изменяться, поскольку она определяется условиями статики, увеличивается степень мобилизации сдвигу в краевых частях потенциальной поверхности скольжения. В результате происходит выравнивание распределения касательных напряжений вдоль потенциальной поверхности скольжения.

В ряде случаев глубинную ползучесть склонов можно рассматривать как самостоятельный вид деформации склонов. Такие оползни иногда называют пластичными; примером могут служить оползни Вольска на Волге. Однако, в большинстве случаев такие движения следует оценивать, как подготавливающую стадию деформации склонов. При ухудшении статических условий увеличивается степень мобилизации сопротивления сдвигу, островоподобные участки развития пикового, а впоследствии остаточного, сопротивления сдвигу распространяются на всю потенциальную поверхность скольжения, и процесс переходит в следующую стадию—оползень.

Существенное значение имеет различный характер деформации в фазе ползучести и в фазе пластичности. В фазе ползучести имеет место

перекашивание грунта, причем градиент скорости ползучести зависит от величины мобилизованного сопротивления сдвигу. Порядок величины скорости ползучести в обычных условиях составляет не более 5 см в год. В фазе пластичности к этой сравнительно малой скорости деформации добавляется значительно большая деформация среза, совершающаяся по поверхности скольжения. Величина этой деформации может достигать 50 см в час, т. е. быть приблизительно в сто тысяч раз больше. Полная скорость деформации склона представляет собой сумму этих двух величин. Понятно, что по сравнению со скоростью среза скорость ползучести пренебрежимо мала, и поэтому наблюдаемое на поверхности склона оползневое смещение в фазе пластичности следует полностью относить за счет среза, происходящего по узкой поверхности скольжения. Только в этом смысле можно говорить о переходе от зон деформации в фазе ползучести к поверхностям скольжения в фазе пластичности.

Протекание оползневого процесса зависит от многих факторов, как-то: геометрической формы склона, его размеров, геологических и гидрогеологических условий, свойств грунтов, особенностей развития оползнеобразующих причин и др. Вследствие этого каждый оползень очень индивидуален, и правы те, которые утверждают, что нет двух оползней совершенно похожих друг на друга.

Вид и характер оползней определяется геологическим строением склонов и реологическими свойствами слагающих их пород. Различные виды оползания склонов можно подразделить на три больших типа: плоскостной, вращательный и общий.

Плоскостное оползание развивается на плоских длинных склонах, сложенных пластами горных пород, падающими параллельно склону или разбитых мощными тектоническими трещинами, имеющими такую же ориентацию, или, наконец, происходящих по поверхности контакта рыхлого делювиального плаща с коренными породами. В этих случаях положение поверхности скольжения принудительно задается геологической обстановкой. Плоскостное оползание совершается по прямолинейным траекториям, направленным параллельно склону.

Вращательное оползание развивается на коротких склонах, сложенных на большую глубину однородными связными грунтами. Анализ многочисленных оползней этого типа показывает, что обрушение склона совершается по некоторой криволинейной поверхности скольжения, очертание которой приближается к круглоцилиндрической поверхности. Вращательное оползание совершается вокруг некоторого центра вращения земляных масс.

Общее оползание происходит в тех случаях, когда в геологическом строении склонов принимают участие породы, обладающие различным сопротивлением разрушению. Оползающие земляные массы вынуждены следовать подземному рельефу ложа, совершая сложные перемещения как в пространстве, так и во времени. Этот тип оползания имеет большое распространение в горных странах.

Рассмотрим последовательно эти три случая обрушения склонов, сконцентрировав внимание на подготовительной фазе глубинной ползучести.

Плоскостная глубинная ползучесть склона

В случае длинного плоского склона можно пренебречь влиянием концевых участков склона и рассматривать его, как склон бесконечной длины. Задача распределения напряжений на теле склона для этого случая аналитически решена. При допущении бесконечного откоса, линии равных значений коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу параллельны поверхности склона, а эпюра значений этого коэффициента по глубине возрастает вниз.

На некоторой глубине от поверхности грунта значение коэффициента $\operatorname{tg}\theta$ мобилизованного сопротивления сдвигу делается равным условному порогу ползучести $\operatorname{tg}\theta_0$. Грунт, расположенный выше этой границы, находится в фазе жесткости, а ниже нее—в фазе глубинной ползучести. Так как разность $\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\theta_0$ возрастает с глубиной, то наибольшую скорость ползучести обнаруживают слои грунта, расположенные непосредственно над контактом рыхлых грунтов с подстилающими коренными породами. При ухудшении статических условий склона граница зоны жесткости поднимается, а величина мобилизованного сопротивления сдвигу по поверхности контакта с подстилающими породами достигает величины предельного сопротивления сдвига, и происходит оползень.

Эта задача математически доведена до конца и получен ряд расчетных формул, позволяющих определить следующие величины: положение границы зоны жесткости; критическое нейтральное давление, способное вызвать оползание при изменении гидрогеологических условий; коэффициент устойчивости склона; допускаемая высота пьезометрического уровня, необходимая для проектирования дренажа и обеспечения расчетного коэффициента устойчивости склона, и наконец, скорость глубинной ползучести склона.

В результате имевшей место деформации, произвольная вертикаль принимает сложное очертание: криволинейное на участке глубинной ползучести, вертикальное—на участке жесткого перемещения вышележащего грунта и вновь криволинейное на участке поверхностной ползучести.

Своеобразным типом плоскостной глубинной ползучести склонов является расползание блоков, образующееся в тех случаях, когда жесткая плита, лежащая на накопленной плоскости напластования и разбитая вертикальными трещинами на блоки, подстилается выветрелыми породами или другим пластичным материалом. Обычно такие вертикальные трещины образуют ортогональную сетку. При расползании блоков образуется ортогональная система ходов, более широких в нижних частях склонов и сужающихся вверху; примером может служить

известный Лабиринт в тиссово-самшитовой роще в Хосте, у Сочи на Черноморском побережье Кавказа.

Интересны явления, которые развиваются в коренных породах, подстилающих сползающий делювиальный плащ. При такой смене пород и переходе в коренные породы все величины, определяющие скорость глубинной ползучести грунта, изменяются, и, как правило, процесс ползучести прекращается. Однако возможны и такие случаи, когда и ниже этого контакта развивается значительно более медленная ползучесть.

Если оползание происходит по плоскости напластования, то для обнаружения глубинной ползучести в коренных породах требуются специальные методы исследования, и, по-видимому, ее еще никто не наблюдал, хотя в принципе это вполне возможно.

Если геологическое строение склона таково, что падающие параллельно склону пласты представляют собой чередование плотных и мягких пород, то в подстилающих мягких пластах будет иметь место глубинная ползучесть склона, хотя вышележащие пласты коренных пород и будут находиться в фазе жесткости. Таким образом, часть коренных пород будет медленно деформироваться, другая же будет жестко перемещаться по такому ложу.

В литературе имеются описания многих случаев, для объяснения которых можно привлечь указанный механизм оползания. Таковы, например, деформации ползучести мягких девонских глин, расположенных между неповрежденными плотными глинами на участке строительства гидростанции Свирь-III под Ленинградом, или складчатость в нижнеюрских глинах, возникшая при образовании долины в Нортхэмптоне в центральной Англии. Классическим примером такого механизма оползания может служить гора Россберг в Швейцарии, которая сложена наклонными, параллельными склону пластами конгломератов нагельфлю, обладающими известковистыми связями и подстилаемыми перемежающимися пластами глины и мергеля. Только за последнее тысячелетие на южном склоне этой горы имело место около 20 крупных оползней. Упомянутый ранее крупнейший оползень 1806 года у Гольдау относится к этому числу. Значительно большее количество оползней было в доисторическую эпоху, в том числе крупнейшие оползни Оберарт и Гванделенфлю. Во всех этих случаях происходила вначале глубинная ползучесть плиты нагельфлю по подстилающим глинам и мергелям, а затем соскальзывание этой плиты, когда мобилизованное сопротивление сдвига достигло своего предельного значения; в случае оползня в Гольдау мощность плиты нагельфлю составляла около 20 м.

Если пласты круто падают в глубь склона, то явление ползучести может быть легко установлено по загибу голов пластов. Это явление было отмечено во многих районах; из этих случаев можно указать на загиб выветрелых эльбогенских гранитов у Штирна в Чехословакии, или в шиферных гнейсах у Мотто д'Арбино в Тессине, Швейцарии. Такой же механизм имеют гравитационные структуры, описанные Шульцем в долине р. Шаркратма в северо-восточной Фергане в Киргизии.

Маслов предложил метод определения коэффициента вязкости грунтов по наблюдениям за скоростью смещения поверхностных грунтов. Замкнутый вид формулы скорости плоскостной глубинной ползучести позволил решить обратную задачу—определение реологических свойств грунта по результатам наблюдений за смещением грунта на глубине в деформационных колодцах. Наблюдения на открытом деформационном колодце в Сочи позволило впервые измерить предсказанную теоретически деформацию медленной ползучести в области, расположенной ниже поверхности скольжения.

Вращательная глубинная ползучесть склонов

Рассмотрим случай вращательного оползания, которое наблюдается на склонах, сложенных однородными глинистыми грунтами на значительную глубину. Это очень распространенный случай оползания, в частности береговых склонов, сложенных рыхлыми отложениями и подмываемых реками или морями.

Напряженное состояние короткого склона, ограниченного откосом, является очень сложным, и эта задача даже для случая плоского откоса, несмотря на кажущуюся простоту постановки вопроса, еще аналитически не решена. Очень возможно, что в общем виде это решение не будет получено, а для конкретных задач должны быть применены численные методы с привлечением электронных счетных машин. Именно этим путем в последнее время в Швейцарии была решена задача для земляных плотин.

Фотоупругим методом на моделях чисто качественно было установлено, что в теле, ограниченном откосом, имеется некоторая область высокой концентрации касательных напряжений. Применяя понятие о мобилизованном сопротивлении сдвигу, можно представить себе в теле склона область, ограниченную линией $\operatorname{tg}\vartheta_0$, отвечающей значениям мобилизованного сопротивления сдвига, равного условному порогу ползучести. Вне этой области величина коэффициента мобилизованного сопротивления сдвига ниже условного порога ползучести, и поэтому грунт находится в фазе жесткости. Внутри этой области должна происходить глубинная ползучесть, интенсивность которой в каждой точке будет определяться величиной избытка $\operatorname{tg}\vartheta - \operatorname{tg}\vartheta_0$.

Точки грунта совершают вращательные движения вокруг центра потенциальной поверхности скольжения. Однако, скорость движения отдельных точек земляного массива не является одинаковой, вследствие неравномерной мобилизации сопротивления сдвига грунта в пределах зоны ползучести. В общем, наибольшие скорости движения наблюдаются в верхней части зоны ползучести, а ниже по склону они убывают. Так как зона ползучести является сплошной, то отсюда следует, что в пределах области ползучести, наряду со смещением вниз по склону, должно происходить компенсационное расширение зоны. Поэтому зона ползучести имеет изогнутую каплеобразную форму. Другим проявле-

нием этой неравномерности является перераспределение напряжений по поверхности скольжения.

Расположенная над зоной ползучести область испытывает жесткое перемещение вниз по склону, отражая своей формой и видом происходящих деформаций очертание и характер зоны ползучести.

Следствием жесткого перемещения грунта, расположенного над зоной глубинной ползучести, при неподвижности окружающего грунта, является возникновение разрывных деформаций—оползневых трещин. Анализ оползневых трещин занимает видное место в теории оползневого процесса; установлена закономерность размещения основных типов оползневых трещин. Для возможности использования оползневых трещин, с целью анализа напряженного состояния склонов, может служить морфо-генетическая классификация трещин, основанная на признаке характера напряжений, вызвавших данную трещину.

В населенных пунктах и при высокой скорости солифлюкции, где многие трещины не сохраняются, может быть с успехом применен анализ оползневых деформаций зданий и инженерных сооружений. В последнее время была разработана классификация этих явлений.

Общая глубинная ползучесть склонов

Этот весьма распространенный в горных странах тип глубинной ползучести еще недостаточно дифференцирован, и его изучение еще предстоит. Одним из видов этого типа деформации склонов является компенсационная ползучесть, возникающая в эрозионных долинах с горизонтальным напластованием, когда компетентные слои подстилаются некомпетентными. Вследствие этого разгруженное дно долины выпучивается вверх и в некомпетентных слоях проявляется мелкая складчатость. Борта долины испытывают опускание, сопровождаемое разламыванием компетентных пород на блоки. Блоки наклоняются и движутся вместе с массой подстилающих мягких пород по направлению к дну долины. В результате возникает выпучивание в средней части долины и выгибание—в боковых ее частях.

Впервые явление компенсационной ползучести было описано в хорошо известных исследованиях геологического строения долины р. Холлоуел на Нортгемптонском железорудном месторождении в центральной Англии. Здесь в мощных пластичных глинах лейаса возникла мелкая складчатость вследствие врезки неглубокой (до 30 м) долины и происшедшей при этом перегрузки бортов долины; образование долины началось еще в доледниковое время, следовательно, образование этого типа ползучести связано с значительной длительностью процесса. Разламывание бортов долины и медленное сползание блоков компетентных пород хорошо изучено в районе Братского водохранилища. Здесь крупные блоки коренных пород — доломитов и песчаников ордовика и траппов—мощностью до 80 м и длиной до 3 км весьма медленно смещаются по аргиллитам и алевролитам верхнего кембрия без образования по-

верхностей скольжения; процесс начался в верхнем плейстоцене и вероятно продолжается до настоящего времени.

Такого же типа глубинная ползучесть склона, сопровождаемая медленным перемещением крупных блоков четвертичных столбчатых базальтов, залегающих на третичной осадочной толще, хорошо наблюдается в долине р. Азат в Гарни в Армении.

Весьма интересный пример компенсационной глубинной ползучести наблюдался в Островском районе в Чехословакии. Здесь происходило медленное смещение блоков диабазовой интрузии по нижнемеловым мелкочешуйчатым сланцам. Это смещение происходит без образования поверхностей скольжения, т. е. представляет собою типичную глубинную ползучесть склонов.

Приложения теории глубинной ползучести склонов

Глубинная ползучесть склонов развивается под действием ряда оползнеобразующих факторов. Часть этих факторов действует постоянно, другие монотонно возрастают, а третьи подвержены систематическим колебаниям, носящим сезонный или производственный характер. По этой причине скорость глубинной ползучести склонов является изменяющейся величиной, могущей служить удобным мерилем интенсивности воздействия оползнеобразующих факторов и позволяющих составить суждение о состоянии оползневого процесса, так же, как измерение температуры больного позволяет судить о ходе болезни.

Графики оползания, дающие связь между временем, интенсивностью действия оползнеобразующих факторов и скоростью глубинной ползучести склонов могут дать удобную оценку состояния склона, составлять прогнозы оползания, устанавливать эффективность применяемых противооползневых мер. В этой связи представляет интерес возможность осуществления стадийной борьбы с оползнями, заключающейся в последовательном применении противооползневых мер, начиная с наиболее эффективных и ведения наблюдений за ходом затухания оползневого процесса.

Ввиду отсутствия надежных методов точных наблюдений за движениями оползней, был развит дифференциальный метод Келля. Для рационализации этого метода были широко применены номограммы. В результате получен достаточно удобный и точный метод наблюдений.

Для получения данных о разных типах оползней, развивающихся в различных геологических и климатических условиях, были организованы инструментальные наблюдения на ряде оползней как в Армении (оползни на трассе деривации Канакерской ГЭС, у головных сооружений Дзорагетской и Ереванской ГЭС, у здания Гюмушской, Атарбекянской ГЭС, оползни в Арзни и Дилижане), так и вне республики (Лихский оползень на Сурамском перевале в Грузии, Кара-Чухурский оползень близ Баку в Азербайджане, оползень на Пролетарском спуске в Ульяновске, склоны у примыкания плотины Егорлыкской ГЭС на Север-

ном Кавказе, оползни юго-западного склона горы Бытхи в Сочи и др.).

В Ульяновске и Дилижане было обнаружено, что при сложной пластике оползневого ложа смещающиеся массы напоминают земляную реку, извивающуюся в своих берегах.

В Хосте у Сочи наблюдался случай слияния двух медленных земляных потоков. Инструментальными наблюдениями было установлено отклонение струи главного потока вследствие воздействия бокового потока, т. е. явление, хорошо наблюдаемое в реках.

Большое практическое значение имеет площадное изучение глубинной ползучести склонов. Карты распределения движущихся масс позволяют районировать территорию по признаку подвижности. Такие работы, осуществленные в Дилижане, позволили выделить участки для различных хозяйственных целей — тяжелое и облегченное строительство, парки и др.; могут быть также выработаны типы сооружений на оползнях.

Была показана возможность эффективного укрепления оползневого склона с помощью колонн из закрепленного грунта, учитывающая механизм оползания; сечение колонн и их количество могут быть подобраны расчетом.

Важной областью применения теории глубинной ползучести является возможность прогноза оползания; так, для оползания в Ульяновске был дан прогноз обрушения за несколько месяцев до оползня.

Служба краткосрочных прогнозов оползней была организована в военные годы на одном крупном оползне в Грузии, по которому проходила магистральная железная дорога, затем в Армении на зданиях ГЭС. а в последние годы такие работы ведутся в Сочи на фуникулере санатория.

Большой теоретический и практический интерес представляет впервые изученный в Сочи многоярусный оползень. Здесь первый ярус образует вращательная глубинная ползучесть, в котором участвует толща крупных блоков третичных пород мощностью до 60 м; над ним расположен второй ярус оползня — плоскостная глубинная ползучесть, в которую вовлечена толща раздробленных аргиллитов мощностью до 20 м. Вверху проходит третий ярус оползня — медленный земляной поток мощностью до 6 м. Траектория движения земляных масс во всех трех телах и их скорость различны, что и позволяет их выделить и дифференцировать.

Многоярусные оползни, вероятно, не представляют собой редких явлений. В Армении близ средневекового храма Гегарт нами обнаружен чрезвычайно интересный двухярусный оползень; его первый ярус представляет крупный скальный оползень, над которым протекает медленный земляной поток.

Дальнейшее изучение медленных движений грунта в фазе глубинной ползучести позволило выявить многие новые закономерности образования и развития этих деформаций, представляющие особое значение для всего альпийского пояса.

Գ. Ի. ՏԵՐ-ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ

ԼԱՆՋԵՐԻ ԽՈՐՔԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ԴՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Լանջերում գրունտի դանդաղ դեֆորմացիաները կատարվում են տարբեր ձևերով:

Մակերևույթային շերտի դանդաղ տեղաշարժումների դեմոստրացիոգիական կարևոր դերը հանրահայտ է: Ավելի խորը գոտիներում նույնպես կատարվում են դանդաղ շարժումներ:

Բազմաթիվ երկրաբանական տվյալները վկայում են սողանքներին նախորդող՝ լանջերի խորքային սողքի երկարատև ժամանակաշրջանի մասին: Որոշ դեպքերում լանջերը միշտ գտնվում են այդ փուլում: Նկարագրվում են լանջերի խորքային սողքի ուղղագիական նախադրյալները: Այդ դանդաղ շարժումները պարտական են շոշափող լարումների երկարատև ներգործությանը, որոնք անբավարար են խզում առաջացնելու համար, բայց բավականաչափ ինտենսիվ են սողքի համար: Նկարագրվում են լանջերի խորքային սողքի տեսակները՝ հարթակային, պտտական և ընդհանուր:

Մի քանի օրինակներով լուսաբանվում է լանջերի խորքային սողքի տեսության գործնական կիրառումը: