УДК 624.131 + 624.137

# АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА ПРИРОДНЫХ СКЛОНАХ

♦♦♦♦♦

# ANALYSIS OF THE MECHANISM OF THE LANDSLIDE PROCESS ON NATURAL SLOPES

**Стефанов Роман Евгеньевич**
АО «Газпром газораспределение Тамбов»
r.stefanov@internet.ru

**Аннотация.** В статье описаны механизм оползневого процесса и механизм оползневого процесса в стадию подготовки оползня при нарушении общей устойчивости склона. Рассмотрено вязкопластическое течение грунтов, параллельное склону. Приведено описание отделения тела оползня от коренного склона и образования поверхности скольжения, а также деформаций тела оползня и его ложа в процессе основного смещения. Показано, что в изменениях напряжённого состояния тела оползня после его отделения от коренного склона можно выделить 2 основных вида: 1) возникновение краевых неуравновешенных напряжений; 2) изменения напряжённого состояния всего тела оползня при его повороте вокруг горизонтальной оси.

**Ключевые слова:** механизм оползневого процесса; нарушение общей устойчивости склона; вязкопластическое течение грунтов; схемы эпюр оползневых смещений; механизм деформаций склона в стадию подготовки оползней; неоднородность пород в пределах тела оползня; деформации тела оползня в процессе основного смещения.

**Stefanov Roman Evgenievich**
JSC «Gazprom Gas Distribution Tambov»
r.stefanov@internet.ru

**Annotation**. The article describes the mechanism of the landslide process and the mechanism of the landslide process at the stage of landslide preparation when the general stability of the slope is violated. The viscoplastic flow of soils parallel to the slope is considered. The description of the separation of the landslide body from the parent slope and the formation of a sliding surface, as well as deformations of the landslide body and its bed during the main displacement is given. It is shown that in the changes in the stress state of the landslide body after its separation from the parent slope, two main types can be distinguished: 1) the occurrence of marginal unbalanced stresses; 2) changes in the stress state of the entire landslide body during its rotation around the horizontal axis.

**Keywords:** mechanism of the landslide process; violation of the general stability of the slope; viscoplastic flow of soils; diagrams of landslide displacements; mechanism of slope deformations at the stage of landslide preparation; heterogeneity of rocks within the landslide body; deformations of the landslide body during the main displacement.

## Общие замечания

Механизм любого процесса – это последовательность промежуточных состояний и элементарных процессов, с помощью которых достигается конечный результат. В частности, под механизмом оползневого процесса следует понимать последовательную смену деформаций и перемещений во всех точках склона, посредством которых осуществляется возникновение оползня и его смещение, приводящее к конечному результату – достижению склоном нового состояния равновесия.

В оползневом процессе можно выделить следующие элементарные процессы (типы или виды механизма):

1) перекос составляющих склон элементов или связей между ними (сдвиг, изгиб, наклон, кручение, смятие);

2) вязкое или пластическое течение – трансляционное перемещение слагающих горные породы частиц относительно друг друга без нарушения сплошности пород (движение типа ламинарного течения);

3) хрупкое разрушение пород из-за несоответствия их прочности действующим на них напряжениям, заканчивающееся нарушением их сплошности (другие виды разрушения пород – гидродинамическое, разрушение вследствие химического выщелачивания и т.п., хотя они также иногда являются причиной оползней);

4) механическое перемещение – скольжение отделившихся в результате разрушения или свободно лежащих на склоне пород по подстилающим породам (может происходить по единой поверхности или в результате разнообразных деформаций и

перемещений в зоне скольжения конечной толщины, пересечённой серией поверхностей трения).

На одном и том же склоне все перечисленные виды деформаций и смещений могут проявляться одновременно в разных местах или сменять друг друга во времени. Поэтому приведённую классификацию механизмов оползневых процессов мы не отождествляем с классификациями оползней по их механизму. Мы также не выделяем оползни выдавливания или раздавливания в отдельный вид механизма, так как их образование и смещение складывается из тех же перечисленных выше элементарных видов механизма. Мы также не включаем в перечисление механизмов ползучесть, так как этот термин говорит только о ходе нарастания деформации во времени, а не о её механизме. Ползучесть может наблюдаться и в виде перекоса, и в виде пластического течения, и в виде микросдвигов по системе поверхностей скольжения, образующихся при хрупком разрушении.

Механизм оползневых смещений может быть представлен наглядно с помощью эпюр перемещений в вертикальном профиле, которые могли бы дать идеальные глубинные репера. Некоторые характерные эпюры простейших типов перемещения и их сочетаний схематически изображены на рисунке 1.

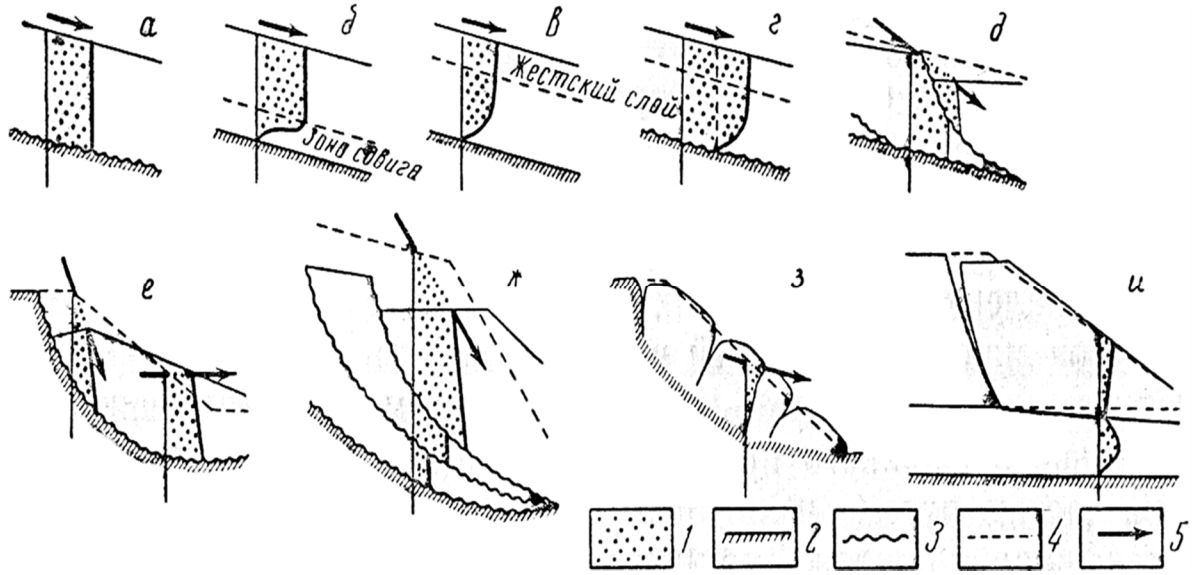


**Рисунок 1** – Схемы эпюр оползневых смещений:
а – при единой плоской поверхности скольжения, параллельной склону;
б – при наличии зоны сдвига конечной толщины, параллельной склону;
в – вязкопластическое течение, параллельное склону;
г – комбинация вязкопластического течения со скольжением по плоскости;
д – комбинация смещений по серии круглоцилиндрических поверхностей скольжения и по плоскости, параллельной склону;
е – по единой круглоцилиндрической поверхности скольжения;
ж – по серии круглоцилиндрических поверхностей;
з – изгиб без отделения пород по поверхности скольжения;
и – начальная фаза выдавливания слабого горизонтального слоя, залегающего между более прочными слоями:
1 – эпюры смещения; 2 – граница неподвижных пород; 3 – поверхность скольжения; 4 – поверхность земли до оползания; 5 – направление смещения точки на поверхности земли

Рисунок 1а, в, е соответствуют трём основным расчётным схемам. Рисунок 1б представляет собой усложнение схемы 1а, а рисунок 1г – усложнение схемы рисунка 1в. Комбинация механизмов смещения, показанная на рисунке 1в, по-видимому, широко распространена. В отношении ледников, движение которых считали образцом вязкого течения, тщательными наблюдениями установлено, что большой процент их смещения осуществляется путём скольжения по ложу. Рисунок 1ж показывает усложнение схемы рисунка 1е. Сочетание скольжения по круглоцилиндрической кривой и по наклонному непо-

движному ложу (рис. 1д) очень характерно для оползней в покровных образованиях. Как известно, эти оползни развиваются деляпсивно[8]: вновь присоединяющиеся к оползню участки отделяются по вогнутым поверхностям скольжения, а затем принимают участие в общем скольжении по наклонному ложу. Временами такие участки при скольжении продолжают несколько поворачиваться по промежуточным криволинейным поверхностям скольжения, вследствие чего мощность оползня постепенно уменьшается. Скорее всего, подобное сочетание вращения с параллельным ложу перемещением имеет место и в оползнях раздавливания в почти горизонтальных слоях.

На рисунке 1з изображена возможность смещений на поверхности склона и без поверхности скольжения в результате изгиба. Наконец, рисунок 1и демонстрирует, что у оползней выдавливания в начальные фазы их развития эпюра перемещения в породах разной прочности имеет разный вид. В действительности сочетания механизмов смещения в пределах одного оползневого склона могут быть ещё сложнее.

К сожалению, фактических данных по механизму оползневых процессов мало. По большей части оползням априорно приписывают тот или другой механизм, частью путём отождествления действительного сложного процесса с упрощёнными расчётными схемами, частью путём некритического использования терминов и классификаций оползней по их механизму («пластические оползни», «оползни течения» и т.п.).

Ниже приведены основные методы получения информации о механизме оползневых процессов:

1) наблюдения за ходом деформаций во времени (по поверхностным и глубинным реперам, путём фиксации развития трещин, деформаций сооружений и растительности);

2) изучение следов деформаций, отражающихся на поверхности земли (съёмка) и в строении тела оползня (различные виды разведки);

3) моделирование в лаборатории.

Однако при отсутствии обоснованной теории информация не всегда собирается целеустремлённо, а накопленные сведения не используются в должной мере. Поэтому ниже нами сделана попытка последовательно рассмотреть некоторые основные закономерности, управляющие механизмом оползневых процессов.

Рассмотрение механизма оползневых процессов должно проводиться в трёхмерном пространстве и во времени, что сложно для непосредственного восприятия. Поэтому его приходится рассматривать по элементам с меньшим числом измерений (например, для определённого момента времени, для определённой точки или поверхности в пространстве и т.п.). Широко распространено рассмотрение условий равновесия склонов и всех зависимостей, связанных с оползневыми процессами, только в продольном вертикальном профиле (рис. 1). Однако развитие оползней в трёхмерном пространстве сопровождается рядом особенностей, которые не могут быть учтены при рассмотрении плоской задачи. Поэтому мы производим рассмотрение механизма оползневых процессов для отдельных его этапов, каждый из которых характеризуется определённым типом преобладающих деформаций или смещений в зоне сдвига, а для этих этапов рассматриваем также распределение типов деформаций или скоростей смещения в пространстве.

**Механизм оползневого процесса в стадию подготовки оползня при нарушении общей устойчивости склона**

Стадия подготовки оползня – это период сближения между собой величин касательных напряжений и прочности пород в будущей зоне сдвига. Такое сближение может идти за счёт или увеличения касательных напряжений в склоне и его основании, или падения прочности пород, или одновременного действия идущих навстречу друг другу данных процессов. При этом относительная величина мобилизованного сопротивления сдвигу возрастает, а породы склона испытывают деформации, величина и тип которых соответствует соотношению их напряжённого состояния и прочности в каждой точке склона, а также условиям работы склона в целом как единой конструкции.

[8] Деляпсивными называют оползни, соскальзывающие под влиянием силы тяжести. Название происходит от латинского «деляпсус» – «падение», «скольжение».

Механизм деформаций склона в стадию подготовки оползней рассматривал Г.И. Тер-Степанян (1957). Он обратил внимание на следующие обстоятельства:

1) как в лаборатории, так и на оползневых склонах при медленном возрастании напряжений разрушение пород не наступает внезапно, а ему предшествует постепенное нарастание деформаций (ползучесть), начинающееся при напряжениях меньших, чем сопротивление сдвигу;

2) напряжённое состояние, соответствующее началу ползучести, достигается не одновременно вдоль всей будущей поверхности скольжения, а сначала возникает в отдельных замкнутых областях.

Учитывая, что ползучесть начинается при предельном напряжении сдвига $\tau_0$, а срез происходит при большем напряжении $\tau_c$, он выделяет в склонах 3 зоны:

1) стабилизации, в которой напряжения менее $\tau_0$;

2) ползучести, в которой напряжения имеют величину между $\tau_0$ и $\tau_c$;

3) среза, в которой напряжения достигают $\tau c$.

В схеме Г.И. Тер-Степаняна нельзя согласиться с тем, что зона ползучести может иметь замкнутый контур. Замкнутая зона, в которой величина касательных напряжений достигает $\tau_0$, будет зоной пластического состояния, а не ползучести. Только когда её граница дойдёт до поверхности земли, зона пластического состояния превратится в зону ползучести.

Аналогия поведения образцов в лаборатории и деформаций, наблюдающихся на оползневом склоне, показана Е.П. Емельяновой (1960) на примере оползней Одессы.

В настоящее время можно выделить 3 этапа изменения состояния пород в склоне и развития в нём деформаций в стадию подготовки оползня (рис. 2).

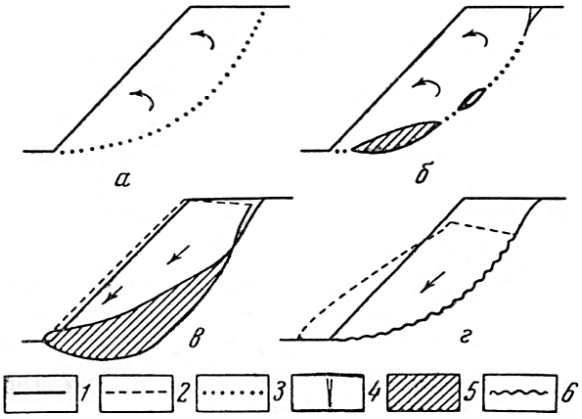


**Рисунок 2** – Схема этапов стадии подготовки глубокого оползня
в однородной и изотропной среде:
а – фаза быстро затухающих деформаций при упругом состоянии всего склона;
б – фаза затухающих деформаций при наличии замкнутых пластических зон;
в – фаза ползучести; г – скольжение по единой поверхности;
1 – первоначальный профиль склона;
2 – профиль склона в результате смещения за данный этап;
3 – потенциальная поверхность скольжения; 4 – трещина растяжения;
5 – зона пластического состояния грунтов; 6 – сформировавшаяся поверхность скольжения

Первый этап – фаза быстро затухающих деформаций при упругом состоянии всего массива пород, слагающих склон. Пока касательные напряжения во всех точках склона меньше предельного сопротивления сдвигу (или порога ползучести) $\tau_0$, вызываемые ими деформации имеют затухающий характер. Это состояние называют упругим, хотя у глинистых грунтов деформации в эту фазу можно назвать упругими только условно, так как они неполностью восстановимы. Склон, напряжённое состояние которого не изменяется, в этой фазе деформаций не испытывает. Однако при каждом увеличении касательных напряжений (например, вследствие подмыва) в склоне с любым большим коэффициентом устойчивости произойдут соответствующие деформации.

Эти деформации будут примерно пропорциональны повышению величины касательных напряжений (поскольку этот этап характеризуется линейной зависимостью между напряжениями и деформациями). Они будут невелики, иметь в основном характер перекоса (рис. 2а) и по прекращении подмыва быстро затухнут. В этот этап развития склона в нём будет только одна зона состояния пород – упругая, и только одна зона деформаций – быстро затухающих.

Второй этап – фаза затухающих деформаций при сложном состоянии пород, слагающих склон (частью упругом, частью пластическом). По мере увеличения величины касательных напряжений в склоне начнут возникать отдельные области, в которых касательные напряжения достигнут величины предельного сопротивления сдвигу $\tau_0$ и порода перейдёт в пластическое состояние. Однако пока эти области остаются замкнутыми, ползучесть не возникает. В этот этап развития в склоне будет только одна зона деформаций – быстро затухающих при сосуществовании двух состояний пород – упругого и пластического (рис. 2б).

Деформации сдвига, как бы они ни были малы, вызывают растяжение в верхней части склона. Возможно, что уже в этот этап по мере нарастания суммарной деформации сдвига начинается зарождение трещин растяжения примерно по направлению будущей поверхности скольжения (рис. 2б). Кроме того, в этот этап возможно уже нарушение пропорциональности между нарастанием напряжений и деформаций.

Третий этап – фаза ползучести (с подфазами, соответствующими видам ползучести – затухающей, установившейся и прогрессирующей). Когда при последующем увеличении касательных напряжений области пластического состояния грунта сольются в одну непрерывную зону, имеющую выход на поверхность земли, в этой зоне начнутся медленно протекающие деформации ползучести, которыми будут увлечены и вышележащие породы, находящиеся в упругом состоянии. В верхней части склона примерно до глубины $h = \frac{2 \cdot \tau_0}{\gamma}$ пластического состояния быть не может вследствие недостаточной величины касательных напряжений. Однако деформации ползучести будут вызывать развитие трещины растяжения вверху склона. Когда трещина углубится до зоны ползучести, по ней начнётся и опускание будущего тела оползня (рис. 2в). Оно будет продолжаться до момента разрушения грунта, после которого перейдёт в скольжение по поверхности (рис. 2г).

Имеющиеся наблюдения за развитием таких трещин на оползневых склонах показывают, что они развиваются не постепенно, а отдельными рывками, что характерно для хрупкого разрушения. Временное ускорение деформаций вызывают также динамические сотрясения (взрывы, прохождение поездов и т.п.). Интересный график смещения репера на оползне Бендорф за 23 года наблюдений привёл Штини (рис. 3). На нём видно, как попадание бомбы в 1941 году вызвало относительно резкое возрастание деформаций, но и после этого ползучее нарастание деформации продолжалось ещё 7 лет до начала катастрофического смещения. Возможны также колебания скорости ползучести вследствие сезонных колебаний устойчивости склонов, на что указывал и Г.И. Тер-Степанян (1957). Однако вследствие малой скорости деформаций ползучести обнаружить её сезонные колебания наблюдениями довольно трудно.

В практике не всегда различают истинную ползучесть, т.е. смещения, происходящие при неизменном напряжённом состоянии, и медленное нарастание деформаций при продолжающемся подмыве и соответствующем нарастании величины касательных напряжений. При редких наблюдениях (что обусловлено малой величиной деформаций) почти постоянная скорость смещения может быть кажущейся, в действительности последнее может состоять из серии отдельных малых подвижек.

Описанная схема этапов стадии подготовки, как и схема Г.И. Тер-Степаняна, имеет в виду нарушение общей устойчивости склона, сложенного однородной породой. Учёт наиболее распространённых в природе геологических условий заставляет внести в эту схему некоторые уточнения и коррективы.

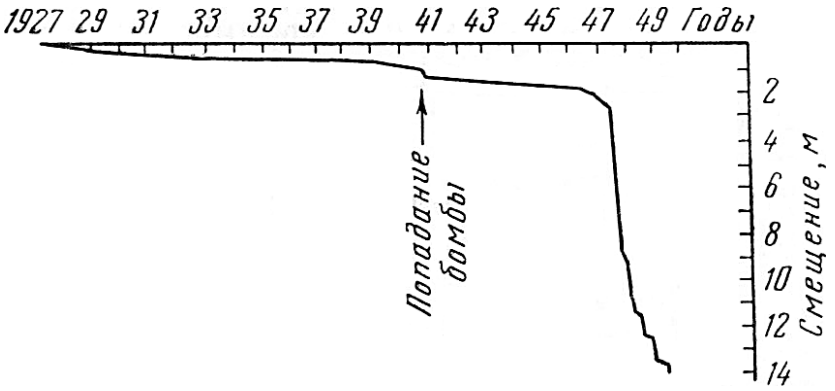


**Рисунок 3** – График вертикального смещения репера на оползне Бендорф (Stini, 1962)

При нарушении общего равновесия склонов стадия подготовки может быть ясно выражена, и деформации ползучести могут достигать значительных размеров только там, где деформации сдвига имеют возможность развиваться в достаточно больших объёмах грунта, т.е. при наличии достаточно мощных слоёв глинистых пород. При смещении по поверхностям ослабления, представляющим границы раздела внутри прочных пород, деформации ползучести будут играть малую роль. Они могут развиваться как при горизонтальном, так и наклонном залегании слоёв глин. Далее рассмотрим только особенности возникновения оползней в почти горизонтальных слоях – оползней раздавливания или выдавливания.

Термин выдавливание подразумевает вязкопластическое течение грунта в результате сближения между собой поверхностей, его ограничивающих. Теоретическое решение задачи об установившемся вязкопластическом течении слоя слабого грунта между неподвижными шероховатыми кровлей и подошвой при условии невесомости слабого слоя и при постоянном градиенте давления дал А.С. Строганов (1961). Он показал, что скорости течения грунта возрастают от нуля у контакта с кровлей и подошвой к середине движущегося слоя по параболическому закону и что в его средней части образуется «жёсткий» слой, движущийся с постоянной скоростью, равной максимальной (рис. 4, I). Толщина жёсткого слоя зависит от начального сопротивления грунта сдвигу $\tau_0$.

Постулируемый А.С. Строгановым постоянный градиент вязкопластического потока при неподвижных кровле и подошве предполагает непрерывное пополнение потока материалом извне, аналогично имеющему место при течении жидкостей в трубах. На оползневых склонах в деформациях участвует одна и та же масса пород, а вязкопластическое течение вызывается именно опусканием кровли слабого пласта. При этом движение слабого слоя всё время является неустановившимся. Поэтому расчётная схема А.С. Строганова для оползней выдавливания не подходит. По-видимому, в этих оползнях процесс вязкопластического течения развивается так, как показано на рисунке 4, II.

Покрывающие слабый слой породы вначале работают как консольная балка, которая прогибается вследствие того, что слабый слой деформируется под её нагрузкой. Когда подошва покрывающих слабый слой пород вследствие прогибания переместится из положения DC в $DC_1$ (рис. 4, IIa), слабый грунт испытает перемещения, эпюры которых показаны на рисунке. При этом по принципу сохранения объёма материала (его сжатием или разбуханием в процессе выжимания можно пренебречь) площадь эпюры перемещения в любой момент и в любом сечении должна быть равна площади между первоначальным и конечным положением кровли от точки начала изгиба D до данного сечения. Так, площадь эпюры $C_1EF$ равна площади $CDC_1$, а площадь эпюры GKL – площади $GDG_1$. Там, где слабый слой выходит на поверхность земли, начнётся образование вала выдавливания. В условиях пространственной задачи объём вала равен полному объёму выжатых пород.

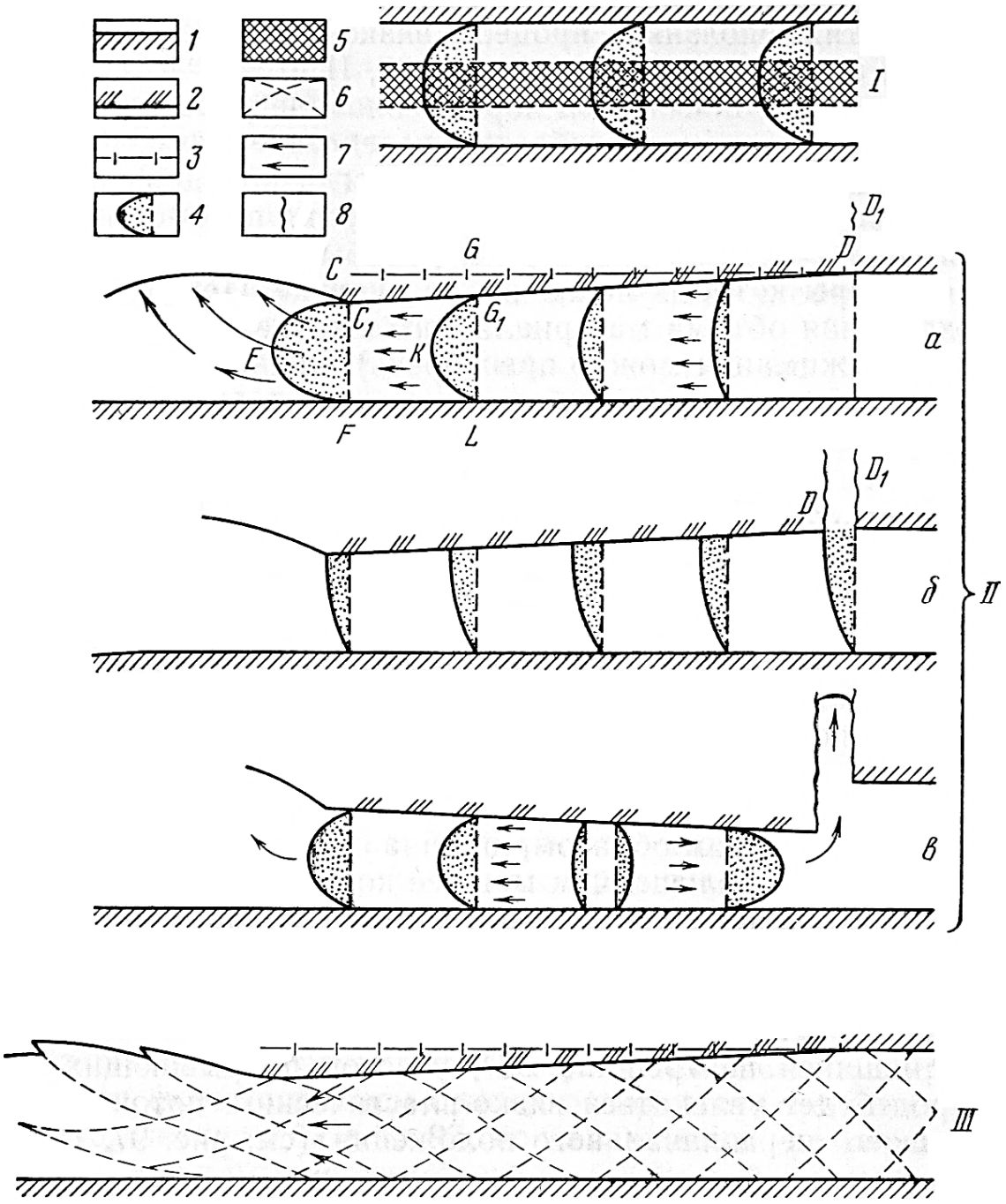


**Рисунок 4** – Схемы механизма и этапов стадии подготовки глубокого оползня в почти горизонтальных слоях:
I – вязкопластическое течение между неподвижными кровлей и подошвой при постоянном расходе потока грунта (по Строганову, 1961);
II – вязкопластическое течение в пределах неизменной массы грунта при деформирующейся кровле;
а – перемещения до разлома консоли, образованной покрывающими слабый слой «жёсткими» породами;
б – перемещения в первый момент после разлома консоли;
в – перемещения после отхода консоли;
III – раздавливание при хрупком разрушении слабого слоя;
1 – неподвижные подошва и кровля слабого слоя;
2 – смещающийся участок кровли слабого слоя; 3 – его первоначальное положение;
4 – эпюры перемещения слабого слоя; 5 – «жёсткий» слой;
6 – поверхности скольжения внутри слабого слоя;
7 – направление перемещений внутри слабого слоя;
8 – стенки трещины в покрывающих слабый слой породах

По мере подмыва склона будет увеличиваться не только прогиб консольной балки $CC_1$, но и её длина $C_1D$, так как точка начала изгиба D будет постепенно перемещаться внутрь склона. Когда стрела прогиба и длина консоли достигнут критической величины, определяемой прочностью слагающих консоль пород, произойдёт их излом по трещине $DD_1$. Таким образом, ширина отделяющейся оползневой ступени будет тем больше, чем мощнее консоль и чем крепче и монолитнее слагающие её породы, чем больше мощность крепких прослоев в ней. В некоторых случаях положение места излома консоли может быть предопределено наличием поверхностей ослабления в массиве пород, лежащем на слабом слое.

Отделившийся по трещине $DD_1$ участок покрывающих слабый слой пород будет увлекаться вязкопластическим потоком и отходить от своего первоначального положения (рис. 4, IIб). При этом максимальной станет скорость смещения не в середине слабого слоя, а у его кровли, а эпюры перемещения приобретут вид, показанный на рисунке.

Отошедший участок кровли ляжет на слабый слой своим полным весом, в результате чего напряжения в слабом слое возрастут; на важность этого момента указывали ранее Ю.Е. Дюливье (1936) и Н.Я. Денисов (1963). Так как мощность блока пород в кровле слабого слоя максимальна на участке отделения от коренного склона и минимальна в сечении CF, его более тяжёлый край просядет на слабом слое больше, и потому отделившийся блок приобретёт наклон в сторону коренного склона (рис. 4, IIв). При этом он начнёт выдавливать грунт из слабого слоя в обе стороны, и эпюры перемещения будут выглядеть, как показано на рисунке, а выдавливаемый материал пойдёт частью на увеличение вала выдавливания, частью на заполнение пустоты между отошедшим блоком и коренным склоном. Участок плато за изломом, наоборот, будет разгружен, и его поверхность испытает соответствующее поднятие.

Такие элементы описанных деформаций, как образование вала выпирания, отделение блока пород и его наклон в сторону коренного склона и даже подъём плато за трещиной отделения, соответствуют наблюдаемым на оползневых склонах в сходных условиях. Однако параллельное смещение частиц в них типа ламинарного течения непосредственными наблюдениями не доказано. Вообще этот тип деформаций можно ожидать в породах, обнаруживающих пластический тип разрушения.

Если порода способна к хрупкому разрушению с образованием поверхностей скольжения (как, например, мэотические глины Одессы), то при сходстве внешних макропроявлений деформаций их внутренний механизм будет другим. В данном случае, когда кровля начнёт прогибаться над слабым слоем, в этом слое возникнут две серии пересекающихся поверхностей скольжения (рис. 4, III). Элементы между этими поверхностями начнут испытывать перекос (на рисунке 4 показано постепенное изменение квадратов с горизонтальными и вертикальными диагоналями, образованных пересекающимися поверхностями скольжения, во всё более вытянутые ромбы). Параллельно будут происходить микросдвиги деформированных элементов друг относительно друга по местным поверхностям скольжения. По данным М.Н. Гольдштейна и др. (1968), в Одессе зеркала скольжения в мэотических глинах обнаружены под плато на расстоянии до 150 м от бровки склона. В результате траектории отдельных точек внутри слабого пласта не будут параллельны как при вязкопластическом течении (собственно выдавливании), а могут быть наклонены друг к другу (рис. 4, III). Такие деформации хрупкого характера могут пройти все этапы развития от быстро затухающих до установившейся ползучести и закончиться формированием единой поверхности скольжения. Картина, изображённая на рисунке 4, подтверждается результатами лабораторного моделирования (Гептнер, 1970).

Поскольку глинистые породы часто обнаруживают тенденцию к хрупкому разрушению, по-видимому, деформации показанного типа (рис. 4, III) наблюдаются при образовании оползней в горизонтально залегающих слоях не реже, а, вероятно, значительно чаще, чем типа пластического выдавливания. Поэтому пока детали механизма каждого конкретного оползня в горизонтальных слоях ещё не подтверждены соответствующими наблюдениями в натуре, целесообразно правильным называть этот тип оползней более общим термином «оползни раздавливания», включающим как вязко-

пластическое течение слабого слоя (собственно выдавливание), так и его хрупкое разрушение с образованием поверхностей скольжения. Не исключена также возможность одновременного существования двух механизмов в разных частях одного оползневого склона: вязкопластического течения в нижних частях склона, где набухание глинистых пород достигло более значительной величины, и хрупкого разрушения на участке отделения от коренного склона, где влажность пород имеет меньшую величину.

Выше рассмотрены только элементарные процессы внутри раздавливаемого слоя, составляющие механизм стадии подготовки оползня. В действительности он много сложнее. Так, оползни раздавливания обычно возникают на склоне, к которому уже прислонены ранее образовавшиеся разновозрастные оползневые ступени в количестве от одной до четырёх, а иногда и более. Эти ступени могут испытывать дифференциальные смещения и деформации, влияющие на механизм прогибания и отделения новой ступени.

Оползни раздавливания часто относят к детрузивным[9], однако имеющиеся фактические данные показывают, что в стадию подготовки их развитие идёт по деляпсивному типу: новый блок отделяется от плато только тогда, когда ниже расположенные оползневые ступени достаточно отойдут от него и лишат его опоры. Только смещения вновь образующейся ступени можно относить за счёт ползучести; смещения нижних ступеней, очевидно, являются повторными смещениями по ранее образовавшимся поверхностям скольжения.

Суммарная амплитуда смещения нового блока, достигаемая за стадию подготовки, в известных нам случаях оползней в горизонтальных слоях измеряется десятками сантиметров (до 1–2 м), но в благоприятных условиях она может достигать и значительно больших величин.

Вопрос о влиянии подземных вод на механизм оползневых процессов в стадию подготовки не вполне ясен. Несомненно, что в трещины, образующиеся в зоне растяжения, возможно проникновение как подземных, так и атмосферных вод. Однако возможность проникновения подземных вод в зону сжатия и сдвига, в которой глинистые породы находятся в пластическом состоянии, весьма сомнительна. Подземные воды извне могут проникать к зоне сдвига только в том случае, если явление сдвига сопровождается увеличением объёма пород.

**Вязкопластическое течение грунтов, параллельное склону**

Вязкопластическое течение рассматривается здесь не только как подготовительный этап в развитии оползня, как проявление ползучести, но и как самостоятельный вид оползневых смещений. Такое течение может возникнуть в чистом виде в породах, не способных к хрупкому разрушению и образованию поверхности скольжения или в породах с большим различием между предельным сопротивлением сдвигу (порогом ползучести) $\tau_0$ и прочностью $\tau_c$, когда длительные и значительные деформации вязкости пластического течения вызывают переформирование склона, не позволяющее напряжениям в нём достигнуть величины $\tau_c$. Наиболее благоприятные условия для вязкопластического течения возникают в глинистых покровных образованиях, залегающих на склонах, сложенных более прочными породами.

Как вязкое, так и вязкопластическое течение представляют собой ламинарное течение, при котором направления перемещения отдельных точек внутри потока совпадают с общим направлением движения потока, а скорости изменяются в пространстве постепенно и по определённым законам. Уравнения установившегося вязкопластического течения пород параллельно бесконечно длинному склону, наклонённому под постоянным углом $\beta$ к горизонту, в условиях плоской задачи выводили многие авторы (Тябин, 1951; Маслов, 1955; Строганов, 1961; Савельев, 1967).

1. В случае вязкого течения, когда порода не обладает начальным сопротивлением сдвигу или оно пренебрежимо мало, распределение скоростей v нормальном сечении движущегося слоя (рис. 5а) подчиняется уравнению:

[9] Детрузивные оползни (от лат. «детрузио» – сталкивание) – это оползни, в процессе развития которых смещающееся тело деформирует, смещает и выдавливает залегающие ниже породы.

$$v = \frac{\gamma}{\eta} \cdot \sin\beta \cdot \left( h \cdot y - \frac{y^2}{2} \right), \quad (1)$$

т.е. отображается параболой. На границе с неподвижным подстилающим слоем скорость равна нулю. У поверхности земли скорость максимальна и определяется по формуле:

$$v_{max} = \frac{\gamma \cdot h^2}{2 \cdot \eta} \cdot \sin\beta. \quad (2)$$

Вязкое течение возникает во всех случаях, когда $\beta > 0$.

2. В случае вязкопластического течения, когда порода обладает начальным сопротивлением сдвигу $\tau_0$ (аппроксимируется телом Бингама – Шведова), ламинарное движение может начаться только на некоторой глубине $h_0$ (см. рис. 5б). Ниже глубины $h_0$ распределение скоростей подчиняется зависимости, соответствующей вязкому течению:

$$v = \frac{\gamma}{\eta} \cdot \sin\beta \cdot \left[ (h - h_0) \cdot y - \frac{y^2}{2} \right]. \quad (3)$$

Выше глубины $h_0$ все частицы движутся с одинаковой скоростью («жёсткий слой»), равной максимальной скорости на верхней границе слоя вязкого течения:

$$v_{max} = \frac{\gamma \cdot (h - h_0)^2}{2 \cdot \eta} \cdot \sin\beta. \quad (4)$$

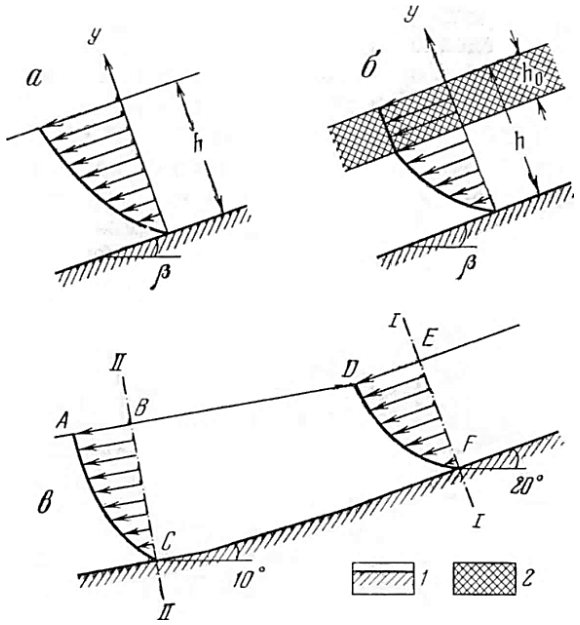


**Рисунок 5** – Схемы вязкого (а, в) и вязкопластического (б) течения грунтов параллельно склону:
1 – неподвижная подошва; 2 – «жёсткий» слой

Мощность жёсткого слоя определяется выражением:

$$h_0 = \frac{\tau_0}{\gamma \cdot \sin\beta}. \quad (5)$$

Если $h_0 \geq h$, вязкопластическое течение возникнуть не может. Условия предельного соотношения h и $\tau_0$ для возникновения вязкопластического течения такие же, как и

для начала оползания по поверхности скольжения при $\varphi = 0$ и $c = \tau_0$ ($\varphi$ – угол; c – сцепление).

При постоянном угле наклона подошвы движущегося слоя к горизонту и при установившемся движении, т.е. при постоянном расходе потока грунта, мощность всего движущегося слоя, его жёсткой части и распределение скоростей во всех сечениях одинаковы. Однако уклоны реальных склонов не постоянны, их длина не бесконечна и движение на них почти никогда не бывает установившимся. Для этих случаев выведены некоторые зависимости.

Если угол наклона подошвы движущегося слоя $\beta$ по направлению течения породы изменяется, то в случае установившегося потока соотношение его мощностей и максимальных скоростей на поверхности земли в разных сечениях I-I и II-II (рис. 5в) при условии неразрывности потока будет определяться равенством расходов в этих сечениях, т.е. равенством площадей изображённых на рисунке эпюр скоростей ABC и DEF.

В случае вязкого течения расход потока S в любом сечении может быть представлен выражением:

$$S = \frac{\gamma \cdot h^3}{3 \cdot \eta} \cdot \sin\beta . \qquad (6)$$

Если обозначить мощность потока и угол наклона подошвы движущегося слоя в двух сечениях I-I и II-II соответственно через $h_1$, $h_2$ и $\beta_1$, $\beta_2$, то при постоянстве расходов будет существовать равенство:

$$\frac{\gamma \cdot h_1^3}{3 \cdot \eta} \cdot \sin\beta_1 = \frac{\gamma \cdot h_2^3}{3 \cdot \eta} \cdot \sin\beta_2 .$$

Поскольку объёмный вес грунта $\gamma$ и его вязкость $\eta$ по течению грунтового потока не изменяются, из этого выражения можно получить следующую зависимость:

$$h_2 = h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2}} . \qquad (7)$$

Отношение максимальных скоростей в сечениях I-I и II-II будет иметь вид:

$$v_{2\max} = v_{1\max} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1}} . \qquad (8)$$

Таким образом, в случае чисто вязкого течения скорость на поверхности уменьшается обратно пропорционально увеличению мощности движущегося слоя и наоборот.

При вязкопластическом течении тенденция изменения общей мощности грунтового потока в связи с изменением угла наклона подошвы движущегося слоя останется такой же, но её количественное выражение имеет более сложный вид, так как при изменении величины $\beta$ будет изменяться и мощность жёсткого слоя $h_0$.

Мощность жёсткого слоя в сечениях I-I и II-II соответственно будет:

$$h_{0(1)} = \frac{\tau_0}{\gamma \cdot \sin\beta_1} ;$$

$$h_{0(2)} = \frac{\tau_0}{\gamma \cdot \sin\beta_2} ,$$

откуда:

$$h_{0(2)} = h_{0(1)} \frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1} , \qquad (9)$$

т.е. мощность жёсткого слоя растёт быстрее, чем общая мощность грунтового потока при чисто вязком течении.

Расход вязкопластического потока S через любое сечение можно представить в виде:

$$S = \frac{\gamma \cdot h^3}{3 \cdot \eta} \cdot \sin\beta + \frac{\tau_0 \cdot h^2}{2 \cdot \eta} + \frac{\tau_0^3}{6 \cdot \eta \cdot \gamma^2 \cdot \sin^2\beta}. \quad (10)$$

Сложность выражения (10) не позволяет сразу оценить характер изменений в вязкопластическом потоке. Необходимо только отметить, что изменение углов наклона подошвы оказывает на вязкопластический поток большее влияние, чем на чисто вязкий. Это влияние тем больше, чем больше относительная мощность жёсткого слоя, т.е. чем больше начальное сопротивление сдвигу.

Таким образом, изменение скоростей на поверхности земли по направлению движения не обязательно свидетельствует о затухании или, наоборот, активизации оползневого процесса в этом направлении: оно может быть следствием только изменения уклона ложа оползня или следствием изменения ширины оползневого потока. Если распределение скоростей по ширине потока постоянно, его мощность и максимальную скорость также можно определить путём сравнения его расходов в разных сечениях.

В природе скорости по поперечному сечению оползневого потока, движущегося параллельно склону, как правило, непостоянны, наблюдается уменьшение скоростей смещения от оси грунтового потока к его бортам. При движении оползневого потока по единой поверхности скольжения различие скоростей может быть следствием дифференциального смещения участков между трещинами, идущими примерно параллельно бортам, или следствием изгибания смещающегося массива в направлении смещения. В случае вязкого и вязкопластического течения уменьшение скорости является следствием уменьшения мощности оползня к его бортам в соответствии с формулами (2) и (4).

Неоднородность пород в пределах тела оползня, влияющая на их вязкость $\eta$ и начальное сопротивление сдвигу $\tau_0$, также будет усложнять картину распределения скоростей в теле оползня. Наибольшее значение имеет неоднородность пород по вертикальному разрезу, почти всегда имеющая место в покровных образованиях. Иногда могут наблюдаться очень сложные случаи изменения $\eta$, $\tau_0$, и, как следствие, – скоростей по вертикали. Например, вязкое течение может оказаться приуроченным только к отдельным прослойкам, а «жёсткие» слои появятся и в средней части смещающейся толщи.

Часто на поверхности покровных образований, имеющих пластичную консистенцию, имеется более или менее мощная кора высыхания, которая и определяет мощность «жёсткого» слоя, увлекаемого течением залегающих ниже более слабых образований. В этом случае, как и в случае, когда вязкопластическое течение происходит в параллельном склону слабом слое, зажатом между прочными породами, распределение скоростей в этом слое будет подчиняться формуле (3), только вместо $h_0$ в неё надо подставить $h_в$ – мощность коры высыхания (если $h_в > h_0$) или мощность прочных пород над слабым прослойком.

Хотя природные склоны не являются бесконечно длинными, длина оползней-потоков часто во столько раз превосходит их мощность, что при большинстве расчётов краевыми эффектами можно пренебречь. Для характеристик потока гораздо важнее степень отклонения его движения от установившегося.

Установившееся движение вязкопластического потока может наблюдаться и на склоне конечной длины, если вверху происходит его питание, а внизу разгрузка в размерах, равных его расходу. Однако питание оползневого потока вверху (тем более с постоянной скоростью) в природе почти всегда отсутствует. Его разгрузка в виде естественного подмыва или искусственной подрезки наблюдается часто, причём величина такой разгрузки нередко соответствует его расходу. В таких случаях течение грунта в нижней части потока можно рассматривать как близкое к стационарному (установившемуся).

Однако почти также часто наблюдаются случаи, когда грунт от подножия склона не удаляется (или удаляется с меньшей скоростью, чем поступает), вследствие чего происходит его накопление в нижней части склона. В этом случае происходит торможение потока, которое заставляет его перестраиваться на большом протяжении. В результате равенство расходов в его последовательных сечениях нарушается. В области накопления баланс масс между любыми двумя сечениями будет положительным ($S_1 - S_2 > 0$) и мощность потока начнёт постепенно увеличиваться. В области уноса масс (в верхней части оползня) он будет отрицательным ($S_1 - S_2 < 0$) и мощность потока начнёт уменьшаться. Аналогичные балансовые соотношения отмечены в Сочи, хотя там движение оползневого потока является не чисто вязкопластическим, а комбинированным со скольжением.

Таким образом, в областях уноса и накопления мощность оползневого потока и скорость вязкопластического течения будут функцией времени. На эти односторонние во времени изменения характеристик потока могут накладываться и их сезонные колебания.

Вообще вязкопластическое течение грунтов на склонах можно рассматривать как установившееся только для ограниченных промежутков времени. При малой скорости эти промежутки могут быть соизмеримы со сроками амортизации сооружений. Поэтому использование формул установившегося движения допустимо при многих практических расчётах. Однако при рассмотрении геологических промежутков времени следует учитывать невозможность длительного сохранения стационарного состояния для вязкопластического течения грунтов на склонах. В результате уноса масс внизу наступит истощение вязкопластического потока и прекращение движения, когда его мощность опустится до мощности жёсткого слоя. При отсутствии подмыва произойдёт переотложение сверху вниз способного к течению материала, который расположится под безопасным для данной его мощности углом $\beta$.

**Отделение тела оползня от коренного склона и образование поверхности скольжения**

Когда напряжения в склоне вдоль будущей поверхности скольжения становятся равными прочности пород, происходит разрушение последних. В процессе этого разрушения сплошность пород в склоне нарушается, тело оползня отделяется от коренного склона и начинает смещаться по поверхности скольжения как постороннее коренному склону. Одновременно происходит резкое перераспределение напряжений как в отделившихся, так и оставшихся на месте породах с возникновением перепада напряжений на их контакте. До отделения тела оползня происходят деформации, общие как для будущего оползня, так и его ложа. Эти деформации подчиняются законам теории упругости, теории пластичности и реологии. После отделения они сменяются механическим перемещением тела оползня, подчиняющимся общим законам механики движения (кинематики и динамики).

Действительные условия разрушения пород в склоне и образования поверхности скольжения значительно сложнее условий, принимаемых в упрощённых расчётных схемах. В пределах однородной толщи пород разрушение начинается в её более или менее значительном объёме и только при значительном смещении локализуется вдоль единой поверхности. На развитие разрушения при сдвиге в пространстве (а не по поверхности) указывал ещё Кьелман (Kjellman, 1955). Именно это обстоятельство заставило его сомневаться в существовании поверхностей скольжения в склонах. Однако образование при многих оползнях единой поверхности скольжения, особенно при смещениях с большой амплитудой, является несомненным.

Положение и форма поверхности скольжения в момент отделения тела оползня должны соответствовать положению и форме сплошной, слившейся из отдельных предельных областей пластической зоны. Поскольку эта зона может иметь переменную, местами значительную толщину, возможны различные варианты положения в ней поверхности скольжения. По-видимому, поверхность скольжения всегда стремится приблизиться к наиболее плавной кривой, вписывающейся в эту зону и удовлетворяющей следующему условию: она должна представлять наименьшее сопротивление начинающемуся смещению не только по суммарному сопротивлению сдвигу, но и по условиям минимальной деформации тела оползня.

Условиям минимальных деформаций тела оползня удовлетворяют поверхности, кривизна которых в направлении смещения остаётся постоянной. В условиях плоской задачи такой поверхностью является круглоцилиндрическая, которая в пределе при $R = \infty$ переходит в плоскость. Как известно, расчёты по круглоцилиндрической поверхности скольжения являются одним из самых распространённых приёмов оценки устойчивости склонов. Когда делают попытку перейти к пространственной задаче, производят расчёты для шаровой поверхности скольжения (Аристовский, 1953; Матрошилина, 1967). Однако в условиях пространственной задачи шаровая поверхность является менее выгодной для образования оползня, чем более вытянутые вдоль склона поверхности. В то же время постоянную кривизну в направлении смещения имеет не только шаровая поверхность, но и любая поверхность вращения с горизонтальной осью. Поэтому по условиям минимальной затраты работы на деформацию тела оползня поверхность скольжения в условиях пространственной задачи должна стремиться приблизиться к поверхности вращения.

Из поверхностей скольжения, отклоняющихся от очертания поверхностей вращения, меньшее сопротивление по условиям деформаций тела оползня оказывают поверхности, кривизна которых книзу уменьшается, так как при скольжении по ним возникает растяжение тела оползня, а сопротивление горных пород растяжению значительно меньше, чем сжатию. По теории предельного равновесия в склоне с очертанием, соответствующим его предельному состоянию, поверхности скольжения также представляют кривые с уменьшающейся книзу кривизной (Соколовский, 1942). По-видимому, выполаживающиеся сверху вниз поверхности скольжения широко распространены в природе.

Однако выполаживающаяся поверхность скольжения по условиям её выхода на поверхность земли не может опускаться глубоко. Между тем относительно глубокие поверхности скольжения часто более опасны, чем мелкие. При этом условии выигрыш от глубины для возможности смещения оползня может оказаться больше, чем потери на сжатие его языка при подъёме по поверхности скольжения, увеличивающей свою крутизну в нижней части. Очевидно, в связи с этим нередко постепенно выполаживающиеся поверхности скольжения в своей нижней части довольно быстро наращивают свою крутизну.

Развитие поверхностей скольжения, удовлетворяющих условиям наиболее выгодного сочетания минимального сопротивления сдвигу и минимальных деформаций тела оползня, возможно только в однородных породах (асеквентные[10] оползни по классификации Ф.П. Саваренского) или, по крайней мере, при большой мощности слабого пласта, в котором развивается поверхность скольжения. По мере уменьшения мощности слабого пласта возможная форма поверхности скольжения становится всё более ограниченной геологическими условиями. В пределе, при смещении по поверхности ослабления или по контакту слоёв, форма поверхности скольжения полностью определяется геологическими условиями (консеквентные[11] оползни).

Третий термин классификации Ф.П. Саваренского – «инсеквентные»[12] оползни чаще всего применяют к оползням раздавливания в горизонтальных слоях. Однако в них слои разного состава обычно сечёт поверхность отделения в зоне растяжения, а не собственно поверхность скольжения. Последняя приурочена только к одному слабому пласту, и её форма связана с его мощностью и условиями залегания.

Все изложенные выше соображения о форме в плане и в профиле относятся к собственно поверхности скольжения. Форма части поверхности отделения в зоне растяжения не влияет на условия начала движения и потому эта часть может быть неправильной, шероховатой, иметь выступы и т.п. Её форма определяется деталями геологического строения и состояния пород в этой зоне.

[10] Асеквентные оползни – это оползни, образующиеся в однородных неслоистых породах (глинах, суглинках, супесях и др.).

[11] Консеквентные оползни (скользящие) – оползни, происходящие при неоднородном сложении склона. Смещение происходит по поверхности раздела слоёв или трещине.

[12] Инсеквентные оползни – это оползни, которые возникают при неоднородном сложении склона, но поверхность смещения которых пересекает слои разного состава. Оползень врезается в горизонтальные или наклонные слои.

Не всегда отделение тела оползня бывает полным, происходит на всей его площади. Иногда большая или меньшая часть тела оползня остаётся связанной с коренным склоном, и контур оползня остаётся незамкнутым. При этом смещение оползня сопровождается изгибом или поворотом связывающих участков горных пород («связок»).

Чаще всего наблюдается сохранение связи вдоль одного из бортов оползня. При этом смещение оползня достигает максимальной величины у противоположного борта и сопровождается поворотом всего тела оползня. В качестве примера на рисунке 6а показан контур оползня на правом берегу р. Белой (бассейн р. Камы). Этот оползень образовался в 1968 году в современных аллювиальных, преимущественно глинистых отложениях, слагающих террасу, в результате подрезки склона траншеей. Как видно на рисунке, левый борт оползня и его голова чётко очерчены трещинами, а правый борт ясной границы не имеет. Величина смещения реперов на оползне растёт от правого борта к левому. Очевидно, связка испытала изгиб (поворот) в направлении, указанном стрелкой. Величина смещения наиболее удалённого от неё репера, равная 3,39 м, при длине поворачивающегося участка 120–150 м соответствует углу поворота всего 1°15′ – 1°40′. Возникновение такого несимметричного смещения, вероятно, связано с тем, что глубина траншеи у правого борта оползня была незначительной, а у левого – максимальной. Основное направление трещины, ограничивающей левый борт, совпадает с границей траншеи.

Более сложный случай сохранения связи с коренным склоном, установленный оползневой станцией на берегу Волги в г. Нижний Новгород, показан на рисунке 6б. Здесь трещины отрыва в голову оползня, идущие от правого и левого бортов, кулисообразно заходят друг за друга, а расположенная между ними полоса коренных пород, не потерявшая связи с коренным склоном, изогнулась в направлении, показанном на рисунке. Отсутствие реперов на этом участке не позволяет дать количественной характеристики величины поворота.

У оползней фронтального типа, имеющих очень большую ширину по сравнению с длиной, при уменьшении амплитуды смещения от оси оползня к его бортам неполное отделение иногда наблюдается и у обоих бортов оползня.

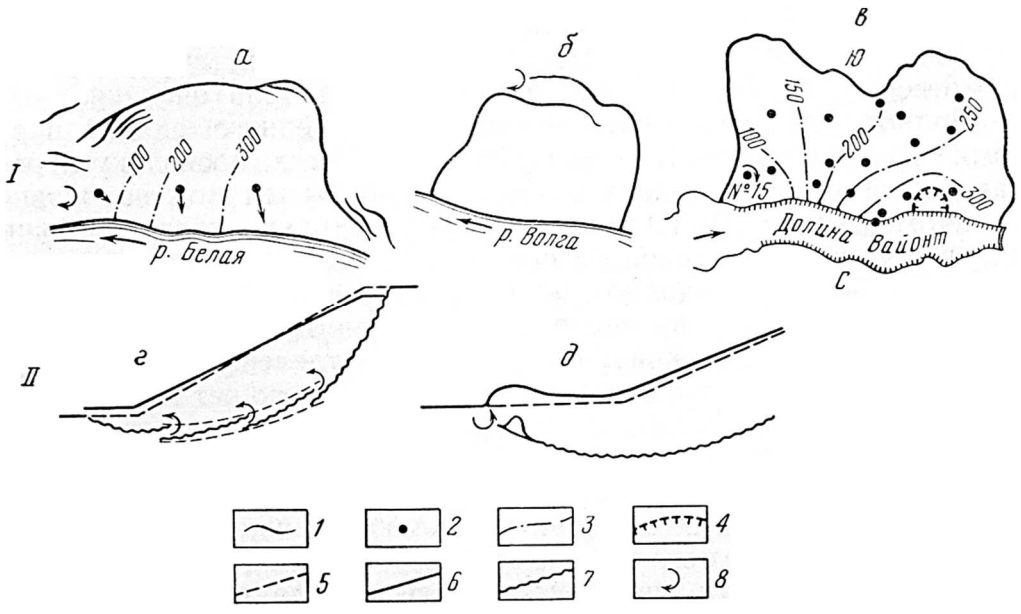


**Рисунок 6** – Примеры неполного отделения тела оползня от коренного склона:
I – в плане; II – в профиле:
а – оползень в Уфе; б – оползень в Горьком; в – оползень у плотины Вайонт;
г – схема неполного отделения по поверхности скольжения;
д – схема неполного отделения в языке оползня;
1 – трещины и границы оползней на поверхности земли; 2 – репера;
3 – изолинии смещения реперов, см; 4 – границы оползня 1963 года у плотины Вайонт;
5 – профиль склона до смещения; 6 – то же, после смещения;
7 – поверхность скольжения; 8 – направление поворота на участке «связки»

Хотя случаи неполного отделения оползня в плане представляют довольно широко распространённое явление, раньше они редко описывались в литературе. Возможно, смещение оползня у плотины Вайонт с 1960 года до катастрофической подвижки 1963 года также было связано с поворотом его западной стороны при неотделившейся восточной. Действительно, трещина отрыва, образовавшаяся в 1960 году и оконтурившая будущий оползень, на приведённой Мюллером (Műller, 1964) карте местности до оползня показана на восточном борту обрывающейся на половине длины оползня. На рисунке 6в на основе данных Мюллера построены изолинии равных горизонтальных смещений поверхности этого оползня до катастрофической подвижки. Ближайший к правому (восточному) борту оползня репер № 15 был почти неподвижен. От него смещения закономерно возрастают по направлению к участку, подрезанному оползнем 1960 года. Такое распределение смещений указывает на изгиб тела оползня в почти горизонтальной плоскости как консольной балки, закреплённой на площади, прилегающей к нижней части его восточного борта, т.е. на том участке, где поверхность смещения катастрофического оползня секла поверхности напластования. Очевидно, отделение тела оползня сначала произошло на том участке поверхности скольжения, где она совпадает с поверхностями напластования. На этом участке сдвигающие силы настолько превышали силы сопротивления сдвигу, что оползень, изгибаясь, постепенно преодолел сопротивление пород и на участке, секущем напластование. Угол поворота оползня в долине Вайонт составлял 13–16, т.е. был в 5–6 раз меньше, чем в глинистых породах (рис. 6а), что отвечает значительно большей жёсткости тела оползня.

Полноту отделения тела оползня от коренного склона в его языке труднее выяснить, чем в голове и бортах, поскольку первоначальный контур оползня оказывается скрытым под наползшим на него языком. По-видимому, в тех случаях, когда подошва оползня выходит у подошвы склона или выше её, в большинстве случаев происходит полное отделение языка оползня. В тех же случаях, когда подошва оползня опускается значительно ниже подошвы склона, возможна разная степень отделения языка от его ложа. При неполном отделении языка оползня может наблюдаться его продольный изгиб, изображённый на рисунке 6д, или его смятие, приводящее к образованию одного, а иногда и двух-трёх параллельных или кулисообразно заходящих друг за друга валов выпирания. У маломощных оплывин на склонах также иногда отмечается изгиб дерна без его разрыва в языке оползня.

Не имеется почти никаких фактических данных о неполном отделении тела оползня в профиле вдоль поверхности скольжения на больших глубинах. Однако поскольку известны случаи неполного отделения тела оползня в плане, есть все основания ожидать возможности и неполного отделения тела оползня в профиле (рисунок 6а). Неполное отделение иногда наблюдается при раздавливании образцов глин в лаборатории даже при хрупком характере их разрушения. Особенно часто приходится наблюдать это явление при раздавливании образцов, диаметр которых в 2 раза превосходил их высоту. Даже после значительного смещения одной части образца относительно другой по поверхности, наклонённой под углом около 45°, разделить образец на две части по этой поверхности было нелегко. При осмотре образца после разделения оказывалось, что не вся указанная поверхность представляла собой блестящую поверхность скольжения, а на ней имелись и шероховатые участки – результат разлома. У оползней раздавливания отношение площади раздавливаемого массива к его мощности обычно ещё больше и условия для неполного отделения ещё более благоприятны.

Возможно, что в оползневых склонах иногда возникает не единая поверхность скольжения, а зона сдвига (см. рис. 6г; пунктир) с многочисленными сравнительно короткими поверхностями скольжения, в большинстве более крутыми, чем общее направление этой зоны. Между поверхностями скольжения располагаются участки глинистых пород изогнутых, перекрученных, смятых, но не отделившихся полностью от коренного массива.

Разумеется, неполное отделение тела оползня в профиле возможно только при относительно небольших амплитудах смещения по этому профилю, а при больших

амплитудах оно может наблюдаться только в начале отделения тела оползня от коренного склона. Под относительно небольшой амплитудой следует понимать значение последней, оцениваемое по величине угла сдвига, изгиба или поворота, которым она соответствует при данных условиях неполного отделения тела оползня. При таком характере отделения тела оползня в плане в глинистых породах наблюдалась возможность поворота на 1–2° без излома (рис. 6). В условиях Одессы, где мощность раздавливаемого горизонта мэотических глин около 35 м, при неполном отделении тела оползня на глубине, углу сдвига 1–2° соответствует амплитуда смещения 60–120 см. Примерно такой величины достигают смещения реперов в Одессе в стадию подготовки оползня. Амплитуды в стадию главного смещения, достигающие в Одессе от 6–8 до 20 м и более, соответствуют углу сдвига от 10–13 до 32° и более. Для перекоса такие углы слишком велики. Очевидно, в стадию главного смещения в Одессе происходит полное отделение тела оползня от своего ложа по всем продольным сечениям, по которым амплитуда смещения достигает нескольких метров, за исключением, может быть, края языка оползня.

В прогрессивное разрушение склона, на которое в последнее время так часто ссылаются в иностранной литературе, по-видимому, входит также постепенное (по мере роста смещения) разрушение связок, соединяющих тело оползня со склоном на отдельных участках его площади.

О широком развитии явлений изгиба без нарушений сплошности горных пород свидетельствуют описанные различными авторами деформации горных пород в районах долин и горных выработок. Такие деформации развиты и на оползневых склонах.

Процесс разрушения пород и отделения тела оползня при наличии хрупких пород сопровождается звуковыми явлениями (треск, шум). Наблюдения за нарастанием интенсивности шумов посредством геофонов начали использоваться для прогноза приближающегося оползневого смещения (Никитин, 1959 и др.). По-видимому, эти шумы и микросотрясения вызывают беспокойство животных перед смещением оползней, неоднократно отмечавшееся в литературе. Во время самого смещения отмечались звуки типа грома и образование облаков пыли. Крупные оползни в скальных породах также нередко вызывали сотрясения, отмечаемые сейсмическими станциями. Так, сотрясение, вызванное смещением оползня у плотины Вайонт, было зарегистрировано в Риме, Триесте, Вене, Базеле, Штутгарте и Брюсселе, но в отличие от землетрясений наблюдались только поверхностные волны (Kiersch, 1964). Громоподобные звуки и сейсмические сотрясения могут быть вызваны как разрушением пород и сопровождающим отделение тела оползня перераспределением напряжений в коренных породах, так и ударом быстро двигающихся оползающих масс о дно долины и её противоположный склон.

**Деформации тела оползня и его ложа в процессе основного смещения**

Ниже рассматриваются деформации, происходящие после отделения тела оползня от коренного склона, во время его перемещения по образовавшейся в результате такого отделения поверхности скольжения.

Деформации единого вначале тела оползня или составляющих его крупных блоков пород могут иметь различную интенсивность – от небольших изгибов, обнаруживаемых только инструментально, до полного раздробления на отдельные обломки. В этой связи могут быть выделены 4 основные причины, приводящие к деформациям тела оползня в процессе его смещения:

1) изменение кривизны поверхности скольжения в направлении движения оползня;

2) различие амплитуд и скоростей смещения по различным сечениям оползня, параллельным направлению его смещения;

3) изменение напряжённого состояния в теле оползня и ориентировки поверхностей ослабления в нём;

4) встреча оползнем препятствия своему движению.

Поверхность скольжения может иметь постоянную кривизну в направлении движения оползня только в том случае, если она представляет собой плоскость или поверхность вращения. Поверхность скольжения может приближаться к плоскости в

той мере, в какой являются плоскостями поверхности наслоения и другие природные поверхности ослабления, по которым происходит смещение. Менее ясно, в какой мере поверхности скольжения могут приближаться к круглоцилиндрическим и другим поверхностям вращения. Однако то обстоятельство, что движение по поверхности вращения не требует деформаций тела оползня, позволяет предполагать, что по принципу наименьшей работы поверхность скольжения внутри толщи однородных пород может стремиться приблизиться к такому очертанию.

Если кривизна поверхности скольжения в направлении смещения изменяется, то форма подошвы оползня перестаёт соответствовать форме его ложа. Это несоответствие может привести к следующим вариантам взаимодействия тела оползня и его ложа:

1) тело оползня, деформируясь, стремится приспособиться к форме своего неподвижного и недеформирующегося ложа;
2) тело оползня сохраняет свою форму, деформируя ложе;
3) деформируются и тело оползня, и его ложе;
4) и тело оползня, и его ложе сохраняют свою форму.

В первых трёх случаях контакт между подошвой оползня и его ложем непрерывно сохраняется. В четвёртом случае контакт будет осуществляться на отдельных участках; местами же между оползнем и его ложем образуются пустоты. Возможно также одновременное осуществление разных вариантов на разных участках одного оползневого склона.

Из перечисленных вариантов всегда будет иметь место тот, осуществление которого в данных условиях встречает наименьшее сопротивление. Тело оползня вследствие своего веса всегда стремится полностью прилегать к своему ложу с соответствующим изгибом. Однако возможность изгиба определяется жёсткостью и монолитностью тела оползня. Встречая на своём пути выступы ложа, оползень стремится их срезать, но возможность этого зависит от относительной прочности пород, слагающих тело оползня и его ложе. Наконец, осуществление полного контакта между телом оползня и его ложем зависит и от скорости смещения, так как при большой скорости необходимые для этого деформации тела оползня могут не успеть развиться (пример – перепрыгивание оползнями долин).

Жёсткость монолитного тела оползня, аналогично жёсткости балки, определяется формулой:

$$W_{балки} = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12}, \tag{11}$$

где $E$ – модуль деформации пород, слагающих тело оползня; $b$ – ширина тела оползня; $h$ – его мощность.

Поскольку часто мощность оползней значительно менее их ширины, жёсткость тела оползня можно также оценить по формуле жёсткости тонкой пластины:

$$W_{пластины} = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot \left(1 - \nu^2\right)}, \tag{12}$$

где $\nu$ – коэффициент Пуассона.

При равных условиях нагружения и длине пролёта величина прогиба обратно пропорциональна жёсткости прогибающегося тела. Поскольку нагрузкой является собственный вес оползня, пропорциональный его мощности, величина прогиба будет обратно пропорциональна квадрату мощности тела оползня и модулю деформации слагающих его пород.

Так как мощность оползней колеблется от долей метра до нескольких сотен метров, а модуль деформации слагающих пород от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч тонн на квадратный метр, то и жёсткость тел оползней, и величина их про-

гиба может отличаться на несколько порядков (в 103–107 раз). Различно и поведение тел оползней при их смещении. Отличающиеся наименьшей жёсткостью маломощные оползни рыхлой или пластичной консистенции поверхностного покрова следуют за всеми достаточно крупными изгибами своего ложа, обычно сложенного более прочными породами. Мощные блоки и массивы коренных пород, отделяющиеся от склона при нарушении его общей устойчивости, в особенности если они состоят из крепких пород или содержат последние в виде прослоев, ввиду своей большой жёсткости нередко сохраняют свою первоначальную форму. Им легче деформировать своё ложе, если оно сложено более слабыми породами (как у оползней раздавливания), чем деформироваться самим.

Если вогнутая часть подошвы оползня при своём движении встречает выступ ложа, т.е. происходит их «зацепление», то может произойти срез выступа ложа, который также будет увлечён смещением и войдёт в состав тела оползня. Однако может произойти и срез нижней части тела оползня, которая прекратит движение, заполнив часть углубления за выступом ложа. Таким образом, тело оползня и его ложе стремятся как бы «притереться» друг к другу с целью создать наиболее плавную поверхность скольжения, оказывающую наименьшее сопротивление при движении. Срежет ли оползень своё ложе или наоборот зависит от их относительной прочности. Всегда более прочная порода срежет более слабую, оползни покровных образований не могут «выпахать» своё ложе, сложенное коренными породами (хотя подобные утверждения встречаются в литературе). При наличии мелких неровностей ложа поверхность скольжения в покровных образованиях становится касательной к их выступам.

Неполное прилегание и пустоты между телом оползня и его ложем могут возникнуть только в том случае, если оба сложены достаточно прочными породами, которые при существующих в них на склоне напряжениях не достигают пластического состояния, а смещение происходит по поверхности ослабления сложной формы. Наличие таких пустот описывал Менкл (Mencl, 1966). Однако этот случай является наиболее редким; наиболее же обычным является приспособление тела оползня к своему ложу при плавном изменении его кривизны.

Некоторые геометрические соотношения, соответствующие последнему случаю, для условий плоской задачи рассматривал Г.И. Тер-Степанян (1967). Им было показано следующее:

1) при смещении по плоскости вектора смещения всех точек оползня равны и параллельны между собой;

2) при смещении по круглоцилиндрической поверхности абсолютная величина векторов уменьшается с увеличением расстояния от поверхности скольжения, нормали ко всем векторам пересекаются на оси вращения;

3) при смещении по криволинейной поверхности, кривизна которой вниз уменьшается, нормали к векторам смещения касаются кривой, обращённой вогнутостью кверху; на поверхности оползня образуются трещины растяжения;

4) при смещении по криволинейной поверхности, кривизна которой увеличивается, нормали ко всем векторам смещения касаются кривой, обращённой выпуклостью кверху; на поверхности оползня возникают трещины сжатия.

Эти соотношения позволяют судить о форме поверхности скольжения на основе наблюдений на поверхности оползня.

Прослеженные Г.И. Тер-Степаняном закономерности можно дополнить и количественной характеристикой растяжения или сжатия, которым подвергается тело оползня. Как видно на рисунке 7а, в пределах участка с кривизной поверхности скольжения $R$ скорость смещения $v_i$ любой точки А внутри тела оползня, расположенной на расстоянии hi от поверхности скольжения, определяется через скорость на поверхности скольжения vn:

$$v_i = v_n \cdot \frac{R - h_i}{R} = v_n \cdot \left(1 - \frac{h_i}{R}\right). \qquad (13)$$

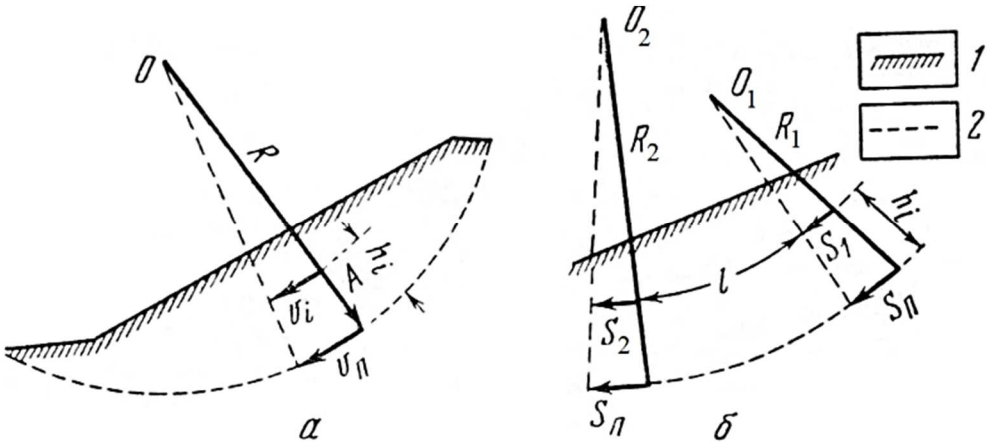


**Рисунок 7** – Схемы распределения скоростей и деформаций в теле оползня при круглоцилиндрической поверхности скольжения (а) и при вогнутой поверхности скольжения переменной кривизны (б): 1 – поверхность земли; 2 – поверхность скольжения; O, $O_1$ и $O_2$ – центры кривизны поверхности скольжения

В таком же соотношении изменяются и суммарные перемещения точек, если они относительно невелики. При одинаковой величине перемещения всех точек подошвы оползня Sn, т.е. при сохранении непрерывности подошвы, величину растяжения или сжатия в теле оползня между двумя нормальными к поверхности скольжения сечениями I-I и II-II (рис. 7б) на уровне hi над поверхностью скольжения можно определить через разность перемещений:

$$\Delta\Sigma = \frac{S_2 - S_1}{L} = \frac{S_n \cdot h_i}{L} \cdot \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \qquad (14)$$

Максимальное растяжение или сжатие наблюдается при максимальном значении hi, т.е. у поверхности оползня; книзу оно затухает и у поверхности скольжения равно нулю.

Так как горные породы очень слабо сопротивляются растяжению и значительно лучше противостоят сжатию, необходимо эти два случая рассмотреть отдельно.

При возникновении растяжения вследствие постепенного выполаживания поверхности скольжения тело оползня разбивается зияющими трещинами, перпендикулярными направлению смещения, бровки которых находятся на одном уровне. Раскрытие трещин книзу уменьшается, и они затухают на глубине, где напряжение растяжения не превосходит предела прочности пород на растяжение. При отсутствии в нижней части тела оползня пластичных пород, способных к растяжению, трещины могут дойти до подошвы оползня и разделить его на отдельные блоки. После такого разделения скорости подошвы оползня у разных блоков могут стать различными.

Деформации растяжения развиваются беспрепятственно и трещины описанного типа весьма обычны на оползнях. Они свидетельствуют о широком распространении постепенно выполаживающихся поверхностей скольжения. Часто трещины растяжения расположены не равномерно по длине оползня, а сосредоточены в отдельных зонах, указывая на места изменения кривизны поверхности скольжения.

Деформации собственно сжатия тела оползня редко бывают велики. Если же значительное изменение кривизны поверхности скольжения требует соответственно большого сокращения длины оползня по его поверхности, то оно может быть осуществлено с помощью разнообразных деформаций, из которых наиболее обычны продольный изгиб, скол и смятие.

При продольном изгибе тело оползня выгибается кверху, образуя вал выпирания. Такой вал чаще всего наблюдается в языке оползней, где уменьшается их мощность и в соответствии с этим их жёсткость. Продольному изгибу способствует неполное отделение тела оползня в его языке (рис. 6д).

В некоторых случаях сжатия, при благоприятных для этого геологических условиях, вместо продольного изгиба может произойти скол тела оползня по поверхностям

надвига, обнаруживающимся на поверхности земли в виде трещин сжатия с одним надвинутым краем. Возможно также неправильное смятие частей тела оползня, сложенных пластичными породами, с изломом тонких более жёстких прослойков.

Изменения кривизны поверхности скольжения в направлении смещения вызывают изгибы тела оползня в вертикальной плоскости. Вторая причина деформаций тела оползня – различие скоростей в его разных, параллельных направлению движения сечениях – может вызывать изгибы и повороты тела оползня почти в горизонтальной плоскости (точнее, в плоскости примерно параллельной поверхности скольжения). Обычно амплитуда смещения оползня максимальна у его оси и уменьшается к его бортам. Вследствие этого происходит выгибание вперёд центральной части оползня, сопровождающееся образованием у бортов серии сравнительно коротких кулисообразно расположенных трещин, зияющих в средней части и быстро утоняющихся к своим концам.

В изменениях напряжённого состояния тела оползня после его отделения от коренного склона, являющихся третьей причиной деформаций тела оползня, можно выделить 2 основных вида:

1) возникновение краевых неуравновешенных напряжений;

2) изменения напряжённого состояния всего тела оползня при его повороте вокруг горизонтальной оси.

Краевые неуравновешенные напряжения возникают во всех случаях, когда тело оползня при смещении теряет в голове и бортах контакт с породами коренного склона. Такие напряжения возникают не только в теле оползня, но и в стенках срыва в коренном склоне, и вдоль трещин растяжения в теле оползня. При соответствующих условиях они приводят к деформациям всех этих обнажившихся при смещении оползня поверхностей, происходящим или во время смещения, или несколько позже. Эти деформации имеют вид обрушения, скола и оседания тонких пластин породы, или образования оползней второго порядка (с возникновением соответствующих локальных поверхностей скольжения). В голове оползня по мере отхода оползших масс могут возникать и следующие оползни первого порядка (развитие по деляпсивному или регрессивному типу). Однако в наиболее неблагоприятных условиях оказываются голова и борта самого тела оползня, так как уклон поверхностей скольжения и отрыва обычно направлен от границ внутрь оползня и откосы тела оползня часто оказываются нависающими. Поэтому в процессе смещения всего оползня от его тела отделяются и сдвигаются в сторону неподвижных частей склона более или менее широкие блоки, образуя просевшие участки («грабены»), столь характерные для бортов и особенно для головы оползня. Обилие трещин, почти всегда наблюдающееся в голове и бортах оползня, в значительной мере обусловлено именно краевыми неуравновешенными напряжениями.

При смещении оползня по криволинейной поверхности скольжения направление силы тяжести каждого элемента внутри тела оползня меняет своё направление на угол, соответствующий углу поворота тела оползня, нередко достигающий 20-40°. Соответственно изменяются величина и направление главных напряжений внутри тела оползня. Одновременно происходит поворот и поверхностей ослабления внутри тела оползня. В результате могут возникнуть такие деформации тела оползня, которые не имели бы места при его первоначальной ориентировке. Так, в областях горизонтального залегания пород становится возможным оползание по наслоению верхней части тела оползня. Например, в Одессе отмечено сползание лёссового покрова и красно-бурых глин с оползших блоков в сторону коренного склона.

Последней причиной, приводящей к деформациям тела оползня, является встреча им препятствия своему движению в виде, например, противоположного борта узкой долины. При большой скорости движения оползня встреча им препятствия приводит к явлению удара, который может привести к полному раздроблению тела оползня на отдельные обломки. Оползни поверхностного покрова, смещающиеся в ложбинах, врезанных в устойчивые породы, нередко встречают препятствие своему движению в виде бортов ложбины при сужениях её сечения или её изгибах. При этом наблюдаются следующие виды деформаций:

1) участок тела оползня, натолкнувшийся на препятствие, прекращает своё движение, «отмирает», а остальная масса продолжает двигаться мимо него;

2) часть тела оползня наползает на свой борт;

3) от тела оползня по поверхностям скольжения второго порядка отделяются блоки меньшей ширины, способные пройти через более узкое сечение.

Очевидно, что наличие, характер и степень развития всех описанных выше деформаций определяются геологическим строением тела оползня, физическим состоянием и степенью монолитности слагающих его пород. Наиболее крупные блоки пород сохраняются в теле оползней, возникающих в почти горизонтальных слоях, так как в условиях платформ многие породы почти монолитны, трещиноватость в них развита слабо. Наоборот, тела крупных оползней, возникающих в дислоцированных скальных породах, почти всегда раздроблены на относительно мелкие обломки.

При относительно небольших смещениях и значительной сохранности основной массы тела оползня на оползневом склоне возникают формы «оползневой тектоники», аналогичные крупным тектоническим формам. Верхняя часть оползневого склона, где тело оползня отходит от коренного склона, в целом всегда является зоной растяжения и характеризующие её деформации представляют собой сбросы и грабены малого масштаба. Нижняя часть оползневого склона, где язык наползает на коренные породы, является в основном зоной сжатия, которую характеризуют образование надвигов и антиклиналей или серии складок.

Когда тело оползня уже при отрыве не является единым или разбивается на части в процессе смещения, дополнительные деформации, которые оно может испытать во время смещения, зависят от механизма смещения, относительной скорости и амплитуды смещения его отдельных частей. Если впереди расположенные участки тела оползня движутся быстрее, чем расположенные сзади, будет наблюдаться растяжение; если же они движутся медленнее – наблюдается сжатие. При этом будут изменяться и длина, и площадь, и средняя мощность оползня.

Обычно нижние части оползня движутся быстрее верхних, при этом увеличиваются его общая длина и площадь, а его средняя мощность уменьшается. Относительная величина этих изменений может служить общим мерилом степени деформированности тела оползня. В этой связи предложено ввести в употребление следующие индексы, удобные при статистической обработке массовых данных:

1) индекс распластывания $I_{рпл}$ – отношение длины тела оползня в конце стадии главного смещения или в любой другой момент его развития $L_i$ к его длине в момент отделения от коренного склона $L_0$:

$$I_{рпл} = \frac{L_i}{L_0}; \tag{15}$$

2) индекс расплющивания $I_{рпщ}$ – отношение площади тела оползня в любой момент его развития $F_i$ к его площади в момент отделения от коренного склона $F_0$:

$$I_{рпщ} = \frac{F_i}{F_0}; \tag{16}$$

3) индекс утонения $I_{ут}$ – отношение средней мощности $h_{ср_i}$ оползня в любой момент его развития к его средней мощности в момент отделения от коренного склона $h_{ср_0}$:

$$I_{ут} = \frac{h_{ср_i}}{h_{ср_0}}; \tag{17}$$

Если масса оползня неизменна (что практически имеет место для момента окончания стадии главного смещения), то с учётом коэффициента разрыхления пород kp индекс утонения представляет собой величину, обратную индексу расплющивания:

$$I_{ут} = \frac{k_p}{I_{рпщ}} = k_p \cdot \frac{F_0}{F_i}. \tag{18}$$

Величина этих индексов для разных типов оползней весьма различна. При полной сохранности тела оползня все три индекса равны единице. У подошвенных оползней в дочетвертичных нормальных глинах они отличаются от единицы всего на несколько процентов.

**Литература**


1. Багаева О.Н. Региональная оценка оползневой опасности: методические аспекты / О.Н. Багаева, Н.Д. Разиньков // Комплексные проблемы техносферной безопасности: Материалы Международной научно-практической конференции (26–28 октября 2017 года, г. Воронеж). – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2017. – Ч. 2. – С. 27–30.
2. Критерий оценки длительной устойчивости откосов на основе анализа процесса образования и развития областей пластических деформаций / А.Н. Богомолов [и др.] // Актуальные проблемы геотехники: сборник статей, посвящённый 60-летию профессора А.Н. Богомолова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 41–52.
3. Экспериментальные и аналитические исследования устойчивости нагруженных откосов в условиях двумерной задачи / А.Н. Богомолов [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38(57). – С. 25–33.
4. Регулирование напряженного состояния и устойчивости земляных сооружений / А.Н. Богомолов [и др.] // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2014. – № 3(34).
5. Емельянова Е.П. Роль климатических факторов в оползневых процессах // Советская геология. – 1958. – № 9.
6. Емельянова Е.П. О значении литологического состава горных пород в оползневых процессах и классификации оползней // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1959. – № 10.
7. Емельянова Е.П. О прогнозе оползневых процессов // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – 1959. – Вып. 16.
8. Емельянова Е.П. О влиянии прочности горных пород и её изменений на оползневые процессы // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. – 1959. – Вып. 17.
9. Иноземцев В.К. Проблемы устойчивости и инженерной защиты строительных объектов на урбанизированных территориях с оползневыми процессами / В.К. Иноземцев, В.И. Редков // Долговечность и надёжность строительных материалов и конструкций в эксплуатационной среде: материалы I Международной научно-технической конференции (14 декабря 2017 года, г. Балаково). – М. : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017. – С. 196–202.
10. Кузин А.А. Оценка оползневой опасности территорий на основе геоинформационных систем / А.А. Кузин, В.П. Ковшов, Ю.М. Волкова // Научные исследования. – 2017. – № 1(12). – С. 6–10.
11. Сайганов А.А. Использование геофизических методов для изучения строения оползневых участков / А.А. Сайганов, Н.П. Шкирман // Булатовские чтения. – 2024. – Т. 1. – С. 86–90.
12. Стефанов Р.Е. Анализ состояния магистрального газопровода и моделирование системы «газопровод – массив грунта» // Технические и технологические системы: материалы XIII Международной научной конференции «ТТС-22» (22–24 ноября 2023 года, г. Краснодар). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2023. – С. 315–323.
13. Стефанов Р.Е. Практическое значение глинистых грунтов для инженерно-геологической оценки и анализ процессов их набухания // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 195–205.
14. Стефанов Р.Е. Лёссовые просадочные грунты: распространение, внешние признаки и типы просадки // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 1. – С. 197–207.
15. Стефанов Р.Е. Методологические аспекты обеспечения безопасности сложных технических объектов в условиях ограниченных ресурсов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2025. – № 1. – С. 106–122.
16. Стефанов Р.Е. Методика по определению отклонений режимных параметров газопровода с учётом неопределённости исходной информации // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2025. – № 1. – С. 226–232.
17. Стефанов Р.Е. Анализ методов неразрушающего контроля для обеспечения надёжности и долговечности сложных систем с высокой степенью отказа // Булатовские чтения. – 2025. – Т. 2. – С. 200–206.

18. Халкечев Р.К. Динамические проявления напряжённо-деформированного состояния природных мультифрактальных объектов. Оползни // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S3-1. – С. 444–448.

## References

1. Bagaeva O.N. Regional evaluation of landslide hazard: methodical aspects // Complex problems of technosphere safety: materials of the International scientific and practical conference (October 26–28, 2017, Voronezh). – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2017. – Part 2. – P. 27–30.
2. Criterion for assessing the long-term stability of slopes based on the analysis of the process of formation and development of plastic deformation areas / A.N. Bogomolov [et al.] // Actual problems of geotechnics: a collection of articles dedicated to the 60th anniversary of Professor A.N. Bogomolov. – Volgograd : Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – P. 41–52.
3. Pilot and analytical studies of stability of loaded slopes under the conditions of two-dimensional problem / A.N. Bogomolov [et al.] // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2014. – № 38(57). – P. 25–33.
4. Regulation of stress state and stability of earthwork structures / A.N. Bogomolov [et al.] // Internet Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – № 3(34).
5. Emelyanova E.P. The role of climatic factors in landslide processes // Soviet Geology. – 1958. – № 9.
6. Emelyanova E.P. On the importance of the lithological composition of rocks in landslide processes and classification of landslides // News of higher educational institutions. Geology and exploration. – 1959. – № 10.
7. Emelyanova E.P. On the forecast of landslide processes // Issues of hydrogeology and engineering geology. – 1959. – Iss. 16.
8. Emelyanova E.P. On the influence of rock strength and its changes on landslide processes // Issues of hydrogeology and engineering geology. – 1959. – Iss. 17.
9. Inozemtsev V.K. Problems of stability and engineering protection of construction projects in urbanized areas with landslide processes / V.K. Inozemtsev, V.I. Redkov // Durability and reliability of building materials and structures in the operational environment: Proceedings of the I International scientific and technical conference (December 14, 2017, Balakovo). – M. : National Research Nuclear University, 2017. – P. 196–202.
10. Kuzin A.A. Assessment of landslide hazard of territories based on geographic information systems / A.A. Kuzin, V.P. Kovshov, Ju.M. Volkova // Scientific research. – 2017. – № 1(12). – P. 6–10.
11. Sayganov A.A. Use of geophysical survey data to study the structure of landslide sites / A.A. Sayganov, N.P. Shkirman // Readings of A.I. Bulatov. – 2024. – Vol. 1. – P. 86–90.
12. Stefanov R.E. Analysis of the state of the main gas pipeline and modeling of the «gas pipeline – soil massif» system // Technical and technological systems: materials of the XIII International scientific conference «TTS-22» (November 22–24, 2023, Krasnodar). – Krasnodar : «Publishing House – South» LLC, 2023. – P. 315–323.
13. Stefanov R.E. Practical significance of clayey soils for engineering-geological assessment and analysis of their swelling processes // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 4. – P. 195–205.
14. Stefanov R.E. Loess subsidence soils: distribution, external signs and types of subsidence // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2024. – № 1. – P. 197–207.
15. Stefanov R.E. Methodological aspects of ensuring the security of complex technical facilities in conditions of limited resources // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2025. – № 1. – P. 106–122.
16. Stefanov R.E. Method for determining deviations in the regime parameters of a gas pipeline taking into account the uncertainty of the initial information // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2025. – № 1. – P. 226–232.
17. Stefanov R.E. Analysis of non-destructive testing methods to ensure reliability and durability of complex systems with a high degree of failure // Readings of A.I. Bulatov. – 2025. – Vol. 2. – P. 200–206.
18. Khalkechev R.K. Dynamic appearance of deflected mode of natural multifructal objects. Landslides // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2013. – № S3-1. – P. 444–448.