

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗВИЛИН В РУСЛАХ РЕК  
И ТАК НАЗЫВАЕМЫЙ ЗАКОН БЕРА \*)****А. Эйнштейн**

Общеизвестно, что русла рек имеют тенденцию приобретать извилистую форму вместо того, чтобы следовать линии максимального уклона местности. Географам также хорошо известно, что реки северного полушария размывают главным образом правый берег. Реки южного полушария ведут себя противоположным образом (закон Бера). Предпринималось много попыток для объяснения этого явления, и я не уверен, будет ли для знатоков новым то, что я скажу ниже; некоторая часть моих соображений, несомненно, является уже известной. Тем не менее, не найдя никого, кто бы до конца был знаком с причинами обсуждаемых эффектов, я считаю уместным дать здесь их краткое качественное описание.

Прежде всего ясно, что эрозия должна быть тем сильнее, чем больше скорость потока там, где он касается рассматриваемого берега; точнее, эрозия должна быть сильнее в том месте ограничивающей стенки, где скорость потока наиболее быстро падает до нуля. Это является правильным при всех обстоятельствах независимо от того, обусловлена ли эрозия механическими или физико-химическими факторами (разложение почвы). Поэтому нам следует концентрировать своё внимание на обстоятельствах, которые влияют на величину градиента скорости у стенки.

В обоих случаях асимметрия обсуждаемого падения скорости косвенно обусловлена образованием циркуляции, на которой мы и сосредоточим наше внимание.

Я начну с маленького эксперимента, который каждый может легко повторить. Представим чашку с плоским дном полную чаю. На дне имеется несколько чайнок, которые остаются там, так как оказываются тяжелее вытесняемой ими жидкости. Если с помощью ложки заставить жидкость вращаться, то чайники быстро соберутся

---

\*) Доложено на собрании Прусской Академии 7 января 1926 г.; опубликовано в Die Naturwissenschaften, 14 (1926).

в центре дна чашки. Объяснение этого явления заключается в следующем: вращение жидкости приводит к появлению центробежных сил. Эти силы сами по себе не могли бы привести к изменению потока жидкости, если бы последняя вращалась как твердое тело. Но по соседству со стенками чашки жидкость удерживается благодаря трению, так что угловая скорость, с которой она вращается, оказывается меньше, чем в других местах, более близких к центру. В частности, угловая скорость вращения, а следовательно и центробежная сила, будет меньше вблизи дна, чем вдали от него. Результатом этого явится круговое движение жидкости, подобное проиллюстрированному

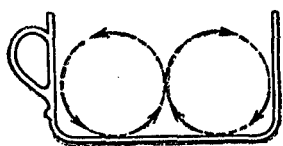


Рис. 1.

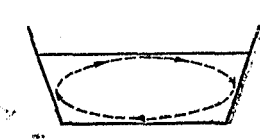


Рис. 2.

на рис. 1, которое возрастает до тех пор, пока под влиянием трения не станет стационарным. Чаинки сносятся в центр круговым движением, чем доказывают его существование.

Подобного же рода положение имеет место для искривлённого потока (рис. 2). В каждом поперечном сечении его течения, там где он искривлён, центробежная сила действует в направлении наружной стороны кривой (от A к B). Эта сила около дна, где скорость течения ослаблена трением, оказывается меньше, чем соответствующая сила в слоях более высоко расположенных над дном. Это обуславливает круговое движение, указанное на рис. 2. Даже там, где нет искривлений реки, круговое движение, подобное показанному на рис. 2, всё же будет иметь место, хотя и в небольших масштабах, как результат земного вращения. Последнее приводит к появлению силы Кориолиса, действующей перпендикулярно направлению течения, правая горизонтальная составляющая которой равна  $2v\Omega \sin \varphi$  на единицу массы жидкости, где  $v$  есть скорость течения,  $\Omega$  — скорость земного вращения и  $\varphi$  — географическая широта. Так как трение о грунт приводит к уменьшению этой силы при приближении к дну, то эта сила также приводит к возникновению кругового движения типа, указанного на рис. 2.

После этого предварительного обсуждения вернёмся к вопросу о распределении скоростей по поперечному сечению потока, что является определяющим фактором в эрозии. Для этой цели мы прежде всего должны ясно представить себе, как развивается и сохраняется (турбулентное) распределение скоростей. Если вода, предварительно находившаяся в покое, вдруг была бы приведена в движение действием равномерно распределенной силы, то распределение скоростей по поперечному сечению оказалось бы сначала равномер-

ным. Распределение скоростей, постепенно возрастающее от ограничивающих стенок в направлении к центру поперечного сечения, установилось бы лишь спустя некоторое время под влиянием трения о стенки. Нарушение (грубо говоря) стационарного распределения скоростей по поперечному сечению установилось бы лишь постепенно под влиянием трения жидкости.

Гидродинамика следующим образом описывает процесс, в результате которого устанавливается это стационарное распределение скоростей. В плоском (потенциальном) потоке все вихревые нити сконцентрированы у стенок. Они отделяются и медленно движутся к центру поперечного сечения русла, распределяясь по слою увеличивающейся толщины. В связи с этим градиент скорости у стенок постепенно уменьшается. Под действием внутреннего трения жидкости во внутренней части поперечного сечения вихревые нити постепенно поглощаются; их место занимают новые, образующиеся у стенок. Так образуется квазистационарное распределение скоростей. Для нас важным является то, что достижение стационарного распределения скоростей является медленным процессом. Вот почему относительно незначительные, постоянно действующие причины способны оказывать значительное влияние на распределение скоростей по поперечному сечению. Рассмотрим теперь, какое влияние оказывает круговое движение, обусловленное, как это показано на рис. 2, изгибом реки или кориолисовой силой на распределение скоростей по поперечному сечению реки. Частицы жидкости, движущиеся наиболее быстро, окажутся дальше всего от стенок, т. е. в верхней части над центром дна. Эти наиболее быстрые части воды будут переноситься циркуляцией к правой стенке, в то время как к левой стенке поступает вода, приходящая из области близ дна и имеющая особо малую скорость. Следовательно, в случае, изображенном на рис. 2, эрозия неизбежно сильнее с правой стороны, чем с левой. Следует отметить, что это объяснение существенно основано на том, что медленное циркуляционное движение воды оказывает значительное влияние на распределение скоростей, потому что регулирование скоростей внутренним трением, противодействующее влиянию циркуляционного движения, также является медленным процессом.

Мы показали причины образования извилин (меандр) реки. Однако на основе сказанного также могут быть без труда выяснены некоторые дополнительные детали. Эрозия окажется сравнительно более сильной не

только у правой стенки, но также в правой половине дна, так что возникнет тенденция к образованию профиля, показанного на рис. 3.

Более того, на поверхность вода будет приходить от левой стенки, и поэтому, в особенности с левой стороны, вода будет

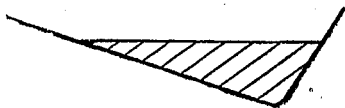


Рис. 3.

двигаться менее быстро, чем в немного более низких слоях. Это и наблюдается в действительности. Далее следует отметить, что круговое движение обладает инерцией. Поэтому циркуляция будет достигать своего максимума лишь после места наибольшей кривизны, и то же самое относится к асимметрии эрозии. Следовательно, в процессе эрозии меандрическая линия реки должна смещаться в направлении течения. Наконец, в случае большего поперечного сечения реки, циркуляционное движение медленнее уничтожается трением, поэтому волнистая линия меандрического образования будет возрастать с увеличением поперечного сечения реки.

---

„Успехи физических наук“, том LIX, вып. 1.

Редакторы: Г. В. Розенберг и В. А. Угаров.

Техн. редактор Н. А. Тумаркина.

Корректор Г. Г. Желтова.

Сдано в набор 17/III 1956 г.

Подписано к печати 15/V 1956.

Бумага 60×92/16

Физ. печ. л. 11,75 + 1 вклейка.

Условн. печ. л. 11,87.

Уч.-изд. л. 12,56.

Тираж 5150 экз. Т-04412. Цена 10 руб. Заказ № 752.

---

Государственное издательство технико-теоретической литературы

Москва, В-71. Б. Калужская, 15

---

Министерство культуры СССР. Главное управление полиграфической промышленности.  
13-я типография. Москва, Гарднеровский пер., 1а.