

М.Ф. Мохнач, А.Н. Павлов

РОДСТВЕННЫЕ ВОДОПАДЫ

M.F. Mokhnach, A.N. Pavlov

ALLIED WATERFALLS

Приведён обзор материалов по Ниагарскому и Тосненскому водопадам, изложены результаты собственных наблюдений авторов, дана оригинальная трактовка развития регрессионной пятащейся эрозии.

Ключевые слова: геологическое строение, скорость эрозии, функция развития, прогнозы.

The paper reviews of recent materials by Niagara Falls and Tosna waterfalls. The results of authors' own observations and original interpretation of backward erosion are given.

Key words: geologic structure, velocity of erosion, function of development, forecasts.

Водопад – место, где ложе потока образует уступ, с которого вода падает вниз.

Геологический словарь [1973]

Общая информация

Речные водотоки являются основным экзогенным фактором формирования рельефа. Эродируя земную поверхность и транспортируя образующиеся наносы, они вырабатывают речные долины – отрицательные линейные формы рельефа, имеющие общий уклон от истока к устью и простирающиеся на различные расстояния, для крупных рек на тысячи километров. Уже с момента своего заложения речные долины постоянно эволюционируют в результате непрекращающейся эрозии, особенно активизирующейся в периоды паводков, когда в русло реки поступает значительное количество воды.

Глубинная и боковая эрозия руслового водного потока, склоновые процессы из-за потоков дождевых и талых вод, выходов подземных вод приводят к увеличению глубины и ширины речной долины и её врезанию вверх по течению в результате регрессионной (пятащейся) эрозии. Происходит геоморфологическое развитие речных долин, меняются очертания основных её элементов – русла реки и склонов. Попеременная активизация глубинной и боковой эрозии в результате изменения базиса эрозии, литологического состава пластов пород и других факторов приводит к образованию на склонах долины ступенеобразных форм рельефа – речных террас. Изучение речных террас позволяет проследить последовательность формирования речных долин.

На всём пути своего прохождения речной поток стремится углубить свою долину, формируя продольный профиль реки, обеспечивающий наименьшую затрату энергии и скорейший спуск водной массы реки. Эта эрозионная работа

осуществляется за счёт кинетической энергии водотока и его химического воздействия на породы ложа реки.

Предельный продольный профиль (профиль равновесия) представляет собой плавную вогнутую кривую. Её крутизна закономерно уменьшается от истоков к устью в результате того, что размывающая сила речного потока постепенно уравнивается сопротивлением пород дна реки. Расстояние по вертикали между верхней и нижней точками кривой профиля равновесия соответствует перепаду высот между истоком реки и уровнем её базиса эрозии.

Профиль равновесия в природе не достигается ввиду неоднородности геологических и физико-географических условий на пути прохождения водотока. Коренные породы, слагающие днище речной долины, имеют различный литологический состав, т.е. разную сопротивляемость размыву. Поэтому интенсивность эрозионной работы водотоков неоднородна и имеет избирательный характер.

В результате продольный профиль реки приобретает вид сложной кривой с различными уклонами. В случае резкого контраста пород ложа по сопротивляемости эрозии, а также при значительном перепаде абсолютных отметок русла реки продольный профиль реки становится ступенчатым, в нём образуются вертикальные или крутонаклонённые уступы различной высоты. Высота уступов определяется абсолютными отметками кровли пластов пород стойких к эрозии и, соответственно, образующих гребень уступа. *Падение водотока с такого уступа, пересекаемого речным руслом, называется водопадом.*

В случае присутствия в разрезе последовательности пластов пород близких по стойкости к эрозии и разделяемых пластами легко эродируемых пород в русле реки образуется в соответствии с положением в разрезе пластов трудно эродируемых пород последовательность уступов. *Падение водотока по таким уступам называется каскадом.*

Таким образом, необходимыми условиями возникновения водопадов являются значительная разница абсолютных отметок истока и устья речных потоков и наличие в профиле русла пород с высокой сопротивляемостью эрозии.

В качестве примера рассмотрим широко известный водопад на р. Ниагара и два небольших водопада в долинах рек Саблинка и Тосна Ленинградской области, где студенты нескольких Санкт-Петербургских университетов уже многие годы проводят полевые занятия по геологии. Эти водопады отличаются по своим масштабам, но в то же время схожи по генезису.

Ниагарский водопад

Ниагарский водопад (Niagara Falls) расположен на р. Ниагара, разделяющей американский штат Нью-Йорк и канадскую провинцию Онтарио (рис. 1). Река Ниагара вытекает из оз. Эри и впадает в оз. Онтарио. На своём 56-километровом пути река опускается почти на 100 м. Пологий продольный профиль реки у озера Онтарио вверх по течению сменяется уступом высотой около 50 м, с которого низвергается водный поток. Его мощность $5700 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ и более.



Рис. 1. Общий вид Ниагарского водопада. Слева – американская часть водопада, справа – канадская. Между ними о. Козий (Интернет, Википедия)

На вершине уступа расположен о. Козий, разделяющий водопад на американский и канадский потоки. Ширина американского потока 305 м, канадского – 914 м. Таким образом, Ниагарский водопад по ширине фронта падающей воды более чем 1200 м является пятым в мире.

Основная масса воды проходит через его канадский поток, названный Подковообразным водопадом из-за вогнутой линии уступа. На американской стороне на расстоянии в 20 м от о. Козий находится небольшой о. Лунный. Водный поток между ними называется водопадом Центральным.

Высота уступа сохраняется на всём его протяжении, но в американской зоне у подножия уступа находится скопление обрушившихся блоков пород высотой до 21 м, поэтому видимая высота уступа американского водопада воспринимается значительно меньшей его реальной высоты.

Образование Ниагарского водопада относится ко времени окончания Висконсинского оледенения. Отступление ледника началось 10–12 тыс. лет назад и полностью завершилось около 7 тыс. лет назад. После схода ледника остался канал, пересекающий крутой доледниковый Ниагарский эскарп (Niagara Escarpment), по которому уходил поток тающей воды (рис. 2).

В результате продолжающихся последующих руслообразующих процессов начал формироваться современный продольный профиль р. Ниагары, унаследовавший выработанный ледником канал, пересекающий доледниковый крутонаклонённый уступ (Niagara escarpment).

Руслоуглубительная работа водотока выше существующего уступа стала затруднительной, когда был вскрыт пласт плотных верхнесилурийских доломитизированных известняков (локпортских), практически субгоризонтально залегающих на слабых легко размываемых нижнесилурийских породах, глинистых сланцах с тонкими прослоями известняков и песчаников. В результате глубоинной эрозии столь различных по стойкости пород в ложе реки на основе существовавшего доледникового уступа выработался современный вертикальный уступ, с которого низвергается водный поток. Плотные верхнесилурийские породы кровли уступа, слагающие около одной его трети, образовали временный базис эрозии.

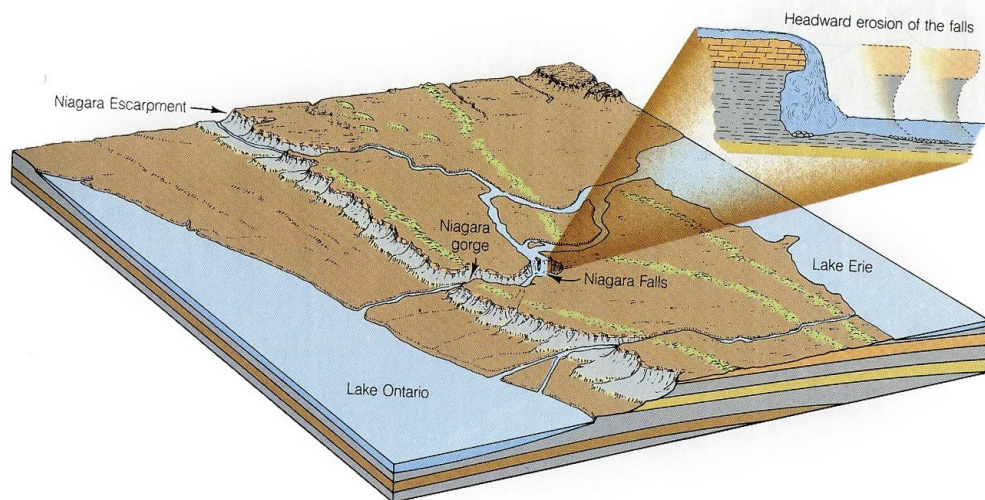


Рис. 2. Схема расположения Ниагарского водопада, дающая представление о геоморфологических особенностях его заложения

Падающая с 50-метрового уступа вода вместе с вращающимися у его основания блоками обрушившейся кровли врезается в песчаники русла реки, образуя жёлоб глубиной до 50 м (приблизительно равной высоте уступа). Вследствие такой активной глубинной эрозии долина реки становится ущельем. Края ущелья возвышаются на 60 м над водной поверхностью реки и на 110 м над её ложем. Река сужается до 100–130 м (почти в 10 раз!). Соответственно, её скорость резко возрастает.

Водный поток водопада сравнительно легко размывает песчано-глинистые породы основания уступа. В результате под кровлей уступа образуется ниша и карниз из плотных локпортских доломитизированных известняков. При достаточном увеличении полого пространства под карнизом происходит его обрушение, что приводит к отступанию водопада вверх по течению.

В 1931 г. рухнула плита кровли массой в 76 тыс. т, а в 1954 г. – в 185 тыс. т. Таким образом, отступление водопада происходит скачкообразно. Каждый скачок происходит одновременно с обрушением кровли.

За последние 10–12 тыс. лет Ниагарский водопад отступил на 11,5 км. Средняя скорость отступления за последние 500 лет составила 1–1,5 м/год. Сейчас водопад находится на 305 м выше по течению от того места, где его увидел французский исследователь Луи Эннепен в 1678 г. Таким образом, можно говорить, что за прошедшие 334 лет средняя скорость отступления Ниагарского водопада составила приблизительно 0,70 м/год, т.е., как и следовало ожидать, темп регрессивной эрозии сократился почти в 1,6 раза.

В настоящее время из-за отвода части водного потока для работы гидроэлектростанции и работ по сохранению водопада средняя скорость его отступления составляет около 0,30 м/год. Американская часть водопада отступает медленнее канадской из-за меньшей мощности водного потока и скопления у подножия уступа обрушившихся блоков доломитизированных известняков, что существенно затрудняет эрозию. С замедлением отступления водопада усиливается боковая эрозия.

Предполагается, что приблизительно через 30 тыс. лет Ниагарский водопад достигнет озера Эри и прекратит своё существование.

Водопады на реках Саблинка и Тосна (Ленинградская область)

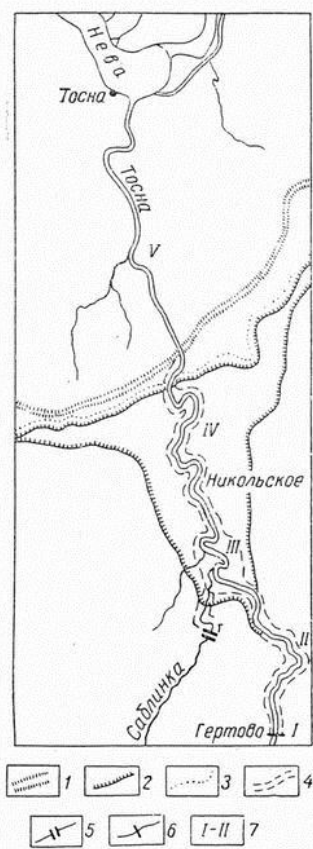


Рис. 3. Схема расположения основных геоморфологических участков долины р. Тосны [5]. 1 – береговой вал; 2 – каньонообразный участок долины; 3 – подножие нижнего уступа глинта; 4 – каньонообразный участок; 5 – водопад; 6 – пороги; 7 – номера участков.

Примечание: авторы схемы порогами называют водопад на р. Тосна у пос. Гертвова

Северо-Западная часть Русской платформы, как и район Великих озёр, является территорией обширного четвертичного оледенения с глубокой экзарацией ложа. Здесь в Ленинградской области полными аналогами Ниагарского водопада по возрасту и геологическому строению, но не по размерам, являются небольшие водопады на реках Саблинка и Тосна (рис. 3).

Река Тосна протекает по Ижорскому плато, имеющему абсолютные отметки 30–40 м, и сложенному нижнепалеозойскими осадочными породами. Она пересекает Балтийско-Ладожский уступ (глинт), далее проходит по Приневской низменности, впадая в Неву. Река Саблинка, левый приток реки Тосны, также начинается на Ижорском плато, частично пересекает глинт и, не доходя до его основания, впадает в р. Тосну.

Долины обеих рек формируются эрозионными процессами. Равнинный характер

рельефа, почти горизонтальное залегание пластов осадочных пород (угол падения колеблется от $0^{\circ}12'$ до $0^{\circ}49'$) и их литологический состав определяют характер речной эрозии. На Ижорской возвышенности реки протекают по площади со слабо расчленённым рельефом. Здесь течение рек медленное, глубинная эрозия незначительна, преобладает боковая эрозия, реки меандрируют.

Характер эрозионных процессов изменяется на участке так называемой Никольской котловины, именуемой также котлом (см. рис. 3). Здесь резко возрастает уклон поверхности и, соответственно, скорость течения. Начинает преобладать глубинная эрозия. Изменяются морфология и параметры речных долин. Долины врезаются в подстилающие горные породы, становятся каньонообразными, узкими с высокими и крутыми склонами.

Формироваться каньоны рек Тосны и Саблилки начали после окончания последнего валдайского оледенения около 10–11 тыс. лет назад, когда Иольдиевое море отступило, и обрывистый берег моря стал сушей. В рельефе образовался уступ – глинт, с которого начал низвергаться водный поток тогда ещё совсем молодой р. Тосны. Заметим, в этой ситуации можно говорить, что *Тосненский водопад является ровесником Ниагарского*.

Первоначально возникший Тосненский водопад отступал от основания глинта до впадения в Тосну р. Саблилки, где он разделился на два независимых водопада – Тосненский на р. Тосна и Саблинский на р. Саблинка (опять же похоже на разделение Ниагарского водопада на американский и канадский рукава).

Благодаря практически горизонтальному залеганию пластов на сравнительно малом расстоянии, менее 2 км, на склоне уступа вскрывается толща пород мощностью до 44–46 м. На этом участке речной поток раскрывает ордовикский и кембрийско-ордовикский водоносные горизонты, дренирование которых дополнительно усиливает интенсивность эрозионных процессов.

Геологический разрез Тосненско-Саблинского района приводится во многих работах [1–3]. Приведём описание одного из них [5].

Вскрываемые реками Тосна и Саблинка нижнепалеозойские породы имеют различную устойчивость к эрозии. Речной поток легко размывает породы, перекрывающие толстоплитчатые глауконитовые известняки (дикари), так же как и подстилающие их слои.

Сам же подгоризонт так называемых «дикарей» представлен плотными, трудно размываемыми известняками мощностью до 1,8 м. Они разбиты трещинами в направлениях 315°СЗ и 60°СВ , расположенными на расстоянии 2–3 м друг от друга. Физическое представление о них даёт фотография одного из обнажений (рис. 4).

Размыв пород, подстилающих толстоплитчатые известняки, усиливается за счёт инфильтрации в них воды по трещинам. Этому способствует также разгрузка подземных вод, находящихся над диктионемовыми сланцами. В результате под карнизом, образуемом плитами глауконитовых известняков, формируется ниша. Её увеличение приводит к периодическому обрушению известнякового карниза,

чему способствуют трещины в известняках. Схема этого процесса удачно иллюстрирована в уже упоминавшейся работе Г.Д. Селиванова и З.А. Сваричевской [6] (рис. 5).



Рис. 4. Студенты Горного института изучают глауконитовые известняки (дикари) на одном из обнажений р. Поповки (1953 г. Из фотоальбома А. Павлова)

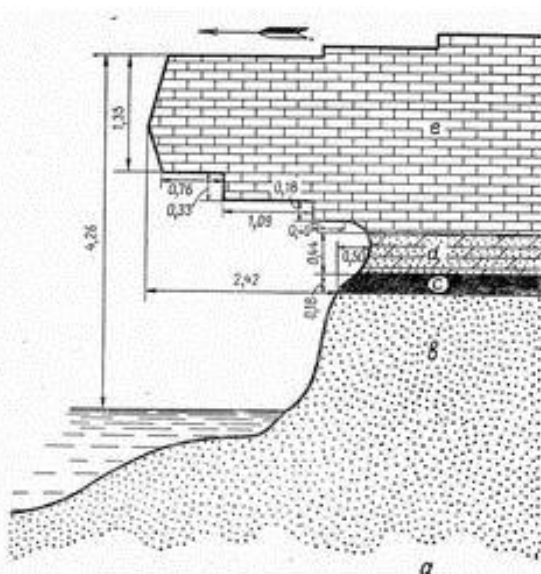


Рис. 5. Геологическое строение уступа водопада.
а – кембрийские глины; б – оболовые пески;
с – диктионемовые сланцы; d – глауконитовая толща;
е – глауконитовые толстоплитчатые известняки

Скорость отступления водопадов непостоянна. Она зависит от мощности водного потока, количества осадков, годового колебания температур, при которых трещины в известняках расширяются, и ряда других факторов. Этими же авторами был проведён анализ имевшихся ко времени публикации материалов, позволивший построить схему отступления Саблинского водопада и оценить средние скорости этого процесса за период с 1936 по 1966 г. (рис. 6).

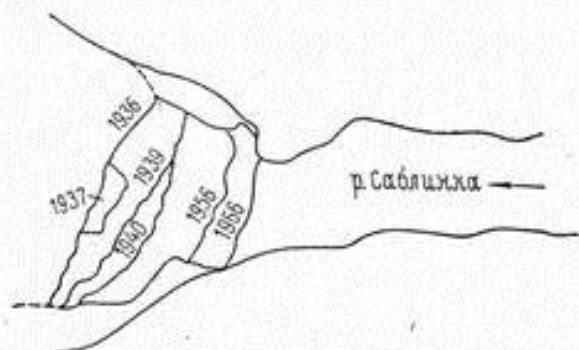


Рис. 6. Схема отступления водопада на р. Саблинки за тридцать лет

В соответствии с этой схемой было установлено, что за этот период величины скоростей колебались в пределах от 0,18 до 1,4 м/год.

Скорость продвижения Саблинского водопада оценивалась и другими авторами [4] – 0,27 м/год.

По Тосненскому водопаду такого рода наблюдений не было. Только сравнение фотографий 1982 и 2000 гг. позволило по его центральной части получить среднюю скорость, приблизительно равную 0,66 м/год. Существенная разница в скорости продвижения Саблинского и Тосненского водопадов связана с различной интенсивностью пятящейся эрозии, из-за разницы в объёмах водных масс и соответственно в мощностях водных потоков этих рек. При приблизительно одинаковых глубинах ширина водных потоков, падающих с уступа, составляет для Саблинского водопада около 7,8 м, а для Тосненского – 24,6 м. При поступлении паводковых вод мощность речных потоков существенно возрастает.

Когда р. Тосна выходит к основанию Балтийско-Ладожского уступа, уменьшается уклон и соответственно убывает гидравлическая энергия водного потока. Боковая эрозия становится преобладающей. Расширяются речные долины, течение замедляется. Это особенно заметно при выходе р. Тосны на Приневскую низменность через первые сотни метров после впадения в неё р. Саблинки. Здесь р. Тосна меандрирует, и её долина расширяется до 2–2,5 км.

Таким образом, на расстоянии не более 1,5–2 км изменяется характер русловых процессов, происходит изменение типа и интенсивности эрозионных процессов в зависимости от уклона земной поверхности и литологии пластов. На Ижорской возвышенности преобладает боковая эрозия. На Балтийско-Ладожском уступе резко возрастает глубинная (вертикальная) эрозия. После прохождения уступа снова усиливается боковая эрозия, и она становится основной при выходе р. Тосны на Приневскую низменность.

Сегодня в распоряжении авторов этой статьи появились новые материалы, которые позволяют ещё раз вернуться к обсуждению Тосненского и Саблинского феноменов.

Начнём с Саблинского водопада. На рис. 7 приведена его фотография, сделанная на полевых занятиях по геологии студентов гидрогеологической специальности Горного института (тогда ЛГИ) в 1953 г. К сожалению, его морфометрические измерения не сохранились. Но и без них, учитывая достаточно условный характер оценок по скорости отступления водопада, можно получить представление о его высоте над урезом воды. Студент, стоящий практически в воде, имеет рост 1,72 м. Второй перед ним – отличался высоким ростом, где-то около 1,9 м, хотя он и стоит сантиметров на 20 выше уреза воды. Ориентируясь на эти «эталонные», легко рассчитать высоту водопада – около 3,7 м (до верхней кромки плиты).

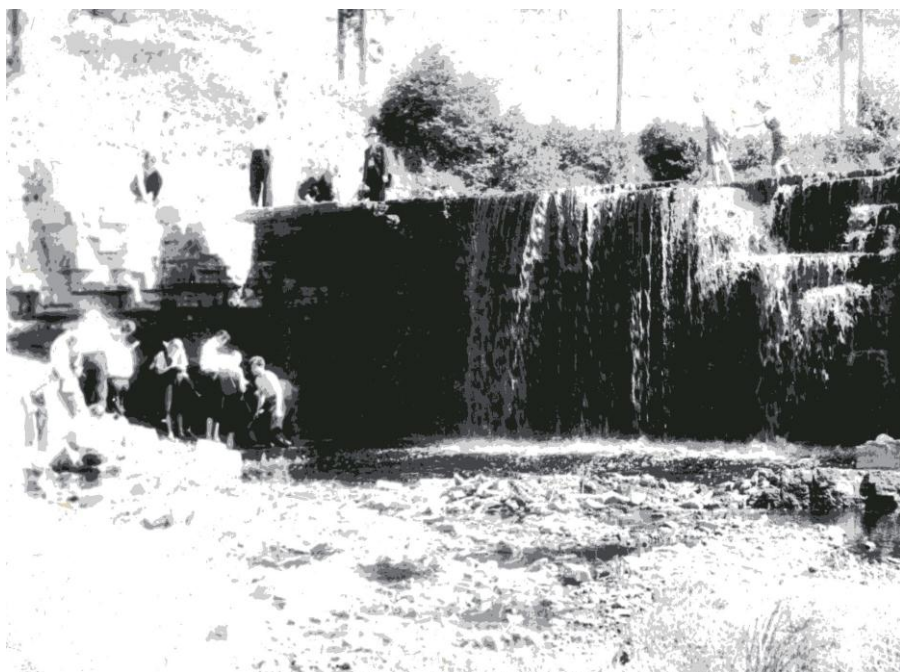


Рис. 7. Общий вид Саблинского водопада (1953 г. Из фотоальбома А. Павлова)

Следующая фотография (рис. 8) была получена в 2011 г. тоже на полевых занятиях по геологии, но уже студентов гидрологов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ).



Рис. 8. Общий вид Саблинского водопада в 2011 г. (фото Е. Чурюлина)

Несмотря на то что под карнизом водопада видна небольшая ниша, можно с достаточной уверенностью говорить, что высота водопада практически совпадает с мощностью толстоплитчатых глауконитовых известняков (дикарей). Это хорошо видно по их обнажению на правом берегу. Напомним, что в соответствии с табл. 1, их мощность равна приблизительно 1,8.

Таблица 1

Геологический разрез района водопадов (с небольшими упрощениями)

Порода	Мощность, м
Суглинок валунный, переходящий в верхней части в почву	1,00
Известняк ортоцератитовый, разбитый крупными трещинами, сильно выветрелый	1,80
Оолиты фосфорно-железистые в мергелях (чечевичный слой)	0,45
Известняк тонкоплитчатый, глауконитовый с прослоями мергелей и глин (фризы)	2,57
Известняки, переслаивающиеся с мергелями и известковыми глинами (желтяки)	1,36
Известняки толстоплитчатые, глауконитовые (дикари), слагающие площадки и бровки водопадов	1,80
Мергель глауконитовый с глинистыми прослоями	0,36
Песчаник глауконитовый слегка глинистый	0,44
Сланец диктионемовый	0,10–0,16
Пески оболовые	Видимая мощность 0,65–1,40

Таким образом, удалось получить ещё одно значение высоты Саблинского водопада. Теперь составим табл. 2, в которую сведём известные нам данные с 1936 по 2011 г.

Таблица 2

Высоты Саблинского водопада по датам измерения

Годы	1936*	1953	1966*	2011
Высота водопада H , м	4,30	3,74	3,10	1,8
Координата времени, год	0	17	30	75

Примечание. * Данные взяты из работы [6].

По этим характеристикам можно построить зависимость $H(t)$ (рис. 9) и получить её математическое выражение:

$$H = H_0 - 0,033t. \quad (1)$$

Зависимости (1) можно доверять, поскольку она получена на основании натурных измерений. Однако эту уверенность не следует *безоговорочно* распространять как в будущее, так и в прошлое. Но соблазн такой есть. Сделаем это, не забывая, что для зависимости (1) временные границы составляют всего лишь 75 лет.

Предположив, что характер зависимости сохранится и в будущем, можно вычислить дату исчезновения Саблинского водопада. Для этого достаточно задаться условием $h = 0$. При этом $t = h_0/0,033 = 130$ лет. Поскольку это время отсчитано от даты 1936 г., легко увидеть, что дата исчезновения водопада на

р. Саблинке придётся на 2066 г. Так что это печальное событие, скорее всего, наши внуки смогут увидеть.

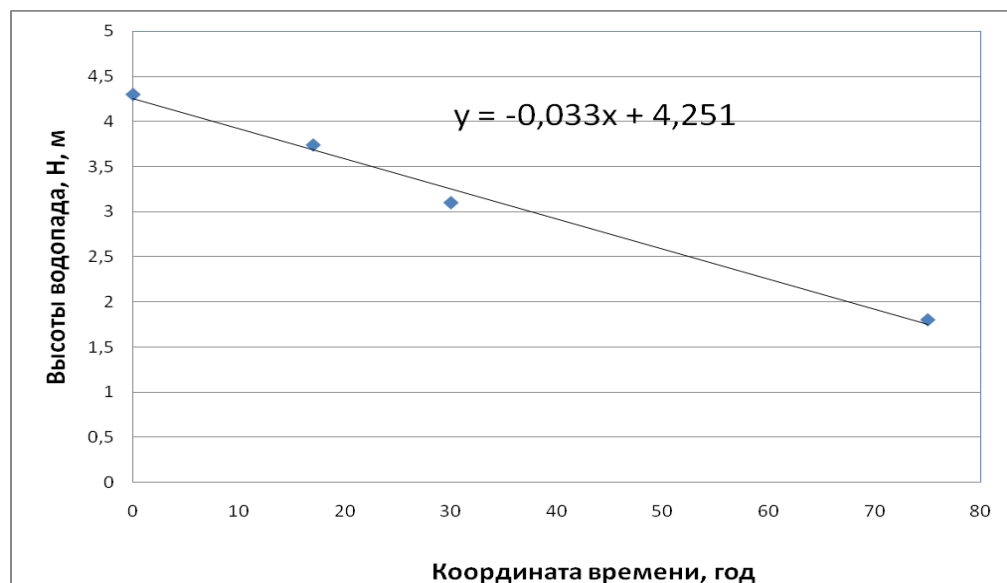


Рис. 9. Зависимость изменения высоты Саблинского водопада во времени за период наблюдений с 1936 по 2011 г. Коэффициент корреляции 0,996

Испытаем нашу зависимость (1) для реконструкции прошлого. В статье Г.Д. Селиванова и З.А. Сваричевской [6] приводится время заложения Саблинского водопада – 6800 лет назад. Естественно, оно получено на основании вынужденных предположений:

1. Расстояние современного водопада от начального его положения (устье современной Саблинки) ≈ 2400 м.
2. Средняя скорость его отступления за 30 лет (1936–1966) – 0,35 м/год.

Воспользовавшись временем 6800 лет, вычислим высоту начального водопада в устье Саблинки по формуле (1). Получим цифру порядка 220 м. Нетрудно показать, что она не может соответствовать действительности. Для этого достаточно получить суммарную мощность палеозойских отложений, вскрытых эрозией на участке впадения Саблинки в р. Тосна. В соответствии с данными различных разрезов, её среднюю величину можно принять равной 37,5 м. К тому же эта цифра хорошо согласуется со средней высотой Ижорского плато, на котором расположены реки Тосна и Саблинка. Заметим, что реальные обнажения на рассматриваемом участке обычно не превышают 30 м. Эту последнюю цифру и примем за расчётную при вычислении датировки зарождения Саблинского водопада по формуле (1). Вычисление даёт число – **780** лет. Знак минус показывает, что величина времени лежит в области слева от принятого нами нуля. Согласовав её с датами правой части шкалы (в принятой шкале ле-

тоисчисления – от рождества Христова), получим **1156** лет. Эта дата больше похожа на реальную. В пользу доверия к ней свидетельствует то, что расчётные параметры были получены на наблюдаемых объектах. Такая дата даёт новую среднюю скорость отступления Саблинского водопада за прошедшие 855 лет $(780+75) - 2400 \text{ м}/855 \text{ лет} = \mathbf{2,8 \text{ м/год}}$. Это существенно больше той цифры, которую принимали Г.Д. Селиванов и З.А. Сваричевская [1967]. Но она хорошо согласуется с тем положением, что скорость пятащейся эрозии у молодых рек больше, чем у зрелых и старых.

Тем не менее, некоторая неопределённость сохраняется. Она связана с общим неустранимым *принципом неразделимости и неслиянности* [5]. В данном случае речь идёт об условной правомерности использования формулы (1) за пределами принятой временной шкалы (в области дат до 1936 г).

Впрочем, такая правомерность довольно просто проверяется. Поскольку принимается (опять же!), что разделение Тосненского и Саблинского водопадов произошло где-то на участке Котла (см. рис. 3), то временные датировки их зарождения как автономных систем должны быть согласованными. Попробуем это проверить.

В прекрасной статье Г.Д. Селиванова и З.А. Сваричевской [1967], к которой мы постоянно обращаемся, утверждается, что современный Тосненский водопад уже давно переродился в пороги. О существовании же самого водопада мы можем судить лишь по остаткам его эвормионных котлов, местами сохранившихся в обнажениях по бортам русла (например, в левом борту, напротив деревни Пустынка). Об этом же могут говорить и омуты, интерпретируемые как чаши древних эвормионных котлов. Опираясь на такого рода находки, названные авторы считают, что до своего перерождения водопад проделал путь приблизительно в 4600 м. Чтобы эта цифра оказалась для нас полезной внимательно рассмотрим три фотографии (рис. 10, 11 и 12).

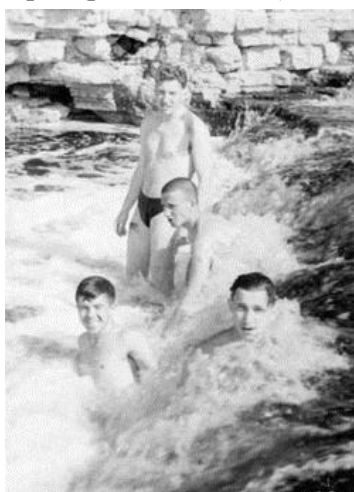


Рис. 10. Вид фрагмента Тосненского водопада (порога) (1953 г. Из фотоальбома А. Павлова)

На втором плане видны плиты береговых устоев разрушенного моста у д. Гертово (см. рис. 3). Студенты стоят на небольшом уступе порога. О его высоте судить трудно, потому что студенты расположились на одном из его уступов.



Рис. 11. Тосненский водопад. Общий вид. (2011 г. Фото Е. Чурюлина)

На правом берегу видна опора моста (та же, что и на фото 1953 г.). За прошедшие 58 лет водопад отступил довольно далеко.



Рис. 12. Тосненский водопад в конце марта 2012 г. (фото М.Ф. Мохнача). Судя по росту человека вдаль около уступа, высота водопада с учётом толщины льда может составлять 1,5–2,0 м

Измерения, проведённые М.Ф. Мохначом, показали, что в сравнении с 1953 г. водопад отступил от опоры где-то на 32 м (до самой вогнутой его части). Таким образом, можно констатировать – за прошедшие 59 лет средняя скорость пятащейся эрозии составила **0,54 м/год**.

По наблюдениям Н.А. Натальина [4], также полученным при сравнении фотографий (1982 и 2000 гг.), средняя скорость отступления составляла **0,66 м/год** (см. выше по тексту).

Ориентируясь на рис. 3, можно оценить приблизительное расстояние отступления Тосненского водопада от устья р. Саблилки в 6800 м. Время отступления, разумеется, для обоих водопадов должно быть одинаковым – 855 лет [в соответствии с формулой (1)]. Тогда средняя скорость пятащейся эрозии для реки Тосны составит $6800 \text{ м} / 855 \text{ лет} = \mathbf{7,95 \text{ м/год}}$. Таким образом, пятащаяся эрозия р. Тосны приблизительно в **2,8 раза** интенсивней, чем у р. Саблилки. Поскольку геологические условия развития этих рек одинаковы, резонно сравнить их средние многолетние расходы. К сожалению, таких данных мы не нашли. Но понимая, что климатические, морфологические и геологические условия их развития одинаковы, вместо расходов можно обратиться к водосборным площадям бассейнов этих рек. Площадь бассейна р. Тосна равна 1640 км², р. Саблилки – 73,2 км². Отношение первой ко второй равно 22,4. Однако *натуральный логарифм* этого числа равен **3,1**, что вполне удовлетворительно согласуется с полученным превышением скоростей пятащейся эрозии 2,8. Это как-то можно объяснить тем, что связь регрессивной эрозии с водосборной площадью реки связана не простым образом, а как минимум с тремя параметрами – средним многолетним расходом, прочностью эродируемого ложа и мощностью бронирующего слоя пород.

Это обстоятельство, вероятно, является довольно общим.

Оценим скорость пятащейся эрозии р. Тосны на участке от глинта, где начинался водопад, до устья р. Саблилки, где он разделился на две части. Судя по рис. 3, это произошло на расстоянии приблизительно в 4500 м от глинта. Высота начального уступа (у глинта) принимается геологами в 45 м (см. выше).

В соответствии с формулой (1) это произошло приблизительно за 450 лет. Тогда средняя скорость пятащейся эрозии на участке от глинта до устья Саблилки составляла порядка **10 м/год**.

Интересно, сравнить эту величину со скоростью отступления Ниагарского водопада. Считается, что за последние 10–12 тыс. лет он продвинулся вверх по течению 11,5 км (см. выше). Разделив эту длину на время, получим **1,0 м/год**.

Выходит, что пятащаяся эрозия р. Тосны практически в 10 раз интенсивней, чем у Ниагарского водопада, хотя у того эрозионные возможности выше на многие порядки. Скорее всего, причина здесь кроется в существенном отличии геологического разреза. Доломитизированные известняки, бронирующие поверхность Ниагарского водопада, намного мощнее и крепче, чем известняки (дикари) в русле р. Тосны.

По литературным источникам известно, что мощность доломитизированных известняков локпортского горизонта, слагающих ложе Ниагарского водопада, составляют приблизительно треть высоты его уступа, что составляет примерно 17 м. Эта цифра как раз превышает мощность глауконитовых толстоплитчатых известняков (дикарей) в ложе Тосненского водопада почти в 10 раз. Таким образом, появляются основания полагать, что развитие Тосненской и Ниагарской системы водопадов происходит по одной генетической схеме.

Авторы уверены, что дальнейшие исследования этого вопроса подтвердят их позицию.

Замечания

В основу изложенных представлений положены расчёты по формуле (1), полученной на основании прямых измерений отступления водопада на р. Саблинке. Однако интерполяции её в область более ранней истории могут вызывать сомнения. Они связаны в основном с высокими скоростями пятащейся эрозии, существенно отличающимися от оценок других исследователей. Не исключено, что линейный закон формулы (1) может быть лишь «хвостиком» другой зависимости высоты водопада от времени. Такой зависимостью может оказаться логистический закон. Очевидно, что его принятие существенно удлинит временную шкалу, начатую нами от 1936 г., в прошлое. *Правда, тогда придётся говорить, что начальная скорость эрозии отступления была небольшой и только со временем стала возрастать, снова уменьшаясь к нашим дням.* При этом надо помнить, что логистическая функция является асимптотической и потому начало и конец существования водопадов не могут быть однозначно зафиксированы на временной шкале. Такое обстоятельство выглядит нормальным, поскольку рождение и смерть водопада должны быть определены на понятийном уровне.

Таким образом, предложенная авторами работа не закрывает проблему водопадов, а стимулирует дальнейшие поиски в направлении выявления закономерностей их появления и развития.

Литература

1. Мохнач М.Ф., Прокофьева Т.И. Методическое пособие по учебной геологической практике. – СПб.: РГГМУ, 2007. – 56 с.
2. Мохнач М.Ф. Особенности речной эрозии Балтийско-Ладожского уступа (на примере рек Тосны и Саблинки) // Уч. зап. РГГМУ, 2008, № 6, с. 78–81.
3. Натальин Н.А. Путешествие в геологию Тосненского района / В кн.: Экскурсии в геологию, т. 3. – СПб.: МК ГШВ, 2005, с. 63-77.
4. Натальин Н.А. Природно-геологическая история местности / В кн.: Натальин Н.А., Ляхницкий Ю.С. и др. Саблино – неизвестная страна. Уникальные памятники природы России. – СПб.: ЛООО «Сохранение природы и культурного наследия», 2007, с. 14-49.
5. Павлов А.Н. Методологические основания современной геологии. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 113 с.
6. Селиванов Г.Д., Сваричевская З.А. Водопад на р. Саблинке (Ленинградская область) // Вестник ЛГУ, 24. Геология и география, 1967, вып. 4, с. 152-158.
7. Hamblin W.K., Christiansen E.H. Earth's dynamic systems. Prentice-Hall, Inc., 1995, 710 p.