

УДК 551.4.04

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРАХ В ОТКРЫТОЙ БАЗЕ ДАННЫХ

© 2025 г. С. В. Харченко^{1, 2, *}, М. И. Успенский^{1, **}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: har4enkkoff@yandex.ru

**e-mail: maksimuspenskii@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2025 г.

После доработки 16.08.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Разработана пополняемая база данных о скоростях экзогенных геоморфологических процессов в горных условиях. Она размещена по веб-адресу: https://geomorphometry.shinyapps.io/geomorphic_rates2/. База включает около тысячи записей о скоростях действий выветривания, ледниковой экзарации, обвальнo-осыпных процессов, медленных массовых движений рыхлого чехла, оползней, плоскостной и овражной эрозии для горных систем по всему земному шару. Несмотря на то, что набор данных постоянно дополняется авторами, предусмотрена возможность волонтерского участия в ее наполнении для заинтересованных специалистов. Идея создания данного проекта состоит в том, чтобы дать геоморфологам инструмент для ориентировочной оценки возможных скоростей экзогенных процессов для произвольных горных территорий, опираясь на данные о совокупности факторов и известные скорости их действия в схожих природных условиях. Знание этих скоростей лежит в основе экспресс-методов оценки интенсивности комплексной денудации в разрезе речных бассейнов и ее географической дифференциации, а также служит для анализа источников поступающего в водотоки и водоемы рыхлообломочного вещества и конструирования схем бюджетов наносов. Все записи содержат данные о местоположении участков мониторинга, его длительности и использованных методах, природных условиях и факторах, а также собственно показатели скоростей. Все данные доступны для свободного скачивания в формате Excel, а также могут быть визуализированы по географическому положению участков наблюдений на карте (OpenTopoMap) или космическом снимке (ESRI Imageyu). Планируется дополнение базы данными о скоростях денудации, ассоциированной с селевыми процессами, а также о речной эрозии (берегов и дна).

Ключевые слова: денудация, открытая база данных, интернет-сервис, Альпы, Кавказ, геоморфологические процессы

DOI: 10.7868/S2658697525060048

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Разнообразие природных условий горных регионов суши нашей планеты ведет к широте спектра действующих экзогенных геоморфологических процессов и их характеристик, в том числе скоростей. В истории геоморфологии было лишь несколько попыток обобщений этих скоростей, причем последние из них были сделаны в конце прошлого века. Наиболее близкие современные цифровые аналоги — базы данных темпов бассейновой денудации, либо современной (по твердому стоку рек и дон-

ных отложений озер и водохранилищ), либо за поздний плейстоцен-голоцен (датированием речного аллювия). На нынешнем этапе назрела необходимость создания базы данных в разрезе отдельных экзогенных процессов, с возможностью картографической визуализации, простого интерактивного анализа и создания графиков (гистограммы скоростей, графики рассеяния), функцией пользовательского пополнения.

Подобная база была бы очень актуальна, полезна и своевременна, в особенности при изучении гор, по двум причинам: 1) горные регионы

были и остаются наиболее динамичными в отношении рельефа участками нашей планеты, скорости преобразования рельефа зачастую столь велики, что их невозможно не учитывать при планировании хозяйственной деятельности, 2) в связи с трендом на повышение глобальных температур — меняется не только рельеф, но и горные ландшафты целиком, в частности, во многих горных системах активно деградирует современное оледенение, что нарушает динамическое равновесие рельефа.

Синтез многочисленных и разнородных данных о его морфологии, генезисе, возрасте и современной динамике — является одним из центральных направлений развития геоморфологии. Говоря о современной динамике рельефа, нельзя не отметить наиболее значимые попытки такой систематизации — это работы и отечественных (Борсук и др., 1977), и зарубежных (Goudie, 1995; Kukal, 1987; и др.) геоморфологов. Формат подобных обобщений в конце XX в. мог быть только “книжный”, что безусловно ценно, но не дает возможностей простого и быстрого анализа собранных данных. В нынешнем веке формат сменяется от монографий и обзоров к цифровым геопространственным базам данных. В частности, большая работа проделана австралийскими коллегами из University of Wollongong по созданию базы данных датировок речного аллювия и денудационных поверхностей (OCTOPUS database) следующими методами: радиоуглеродным, OSL и различными методами космогенных изотопов в контексте скоростей “бассейновой” денудации¹. Однако масштабы времени (лимитированные соответствующими методами) и пространства (целые речные бассейны от малых до крупных) не делают эту базу универсальным источником информации для изучения закономерностей денудации. К сожалению, не существует какого-либо аналога базы OCTOPUS, где бы аккумулировалась информация о темпах современной (за период инструментальных измерений или несколько шире, с учетом косвенных методов, включая датирование) денудации, тем более — в разрезе отдельных экзогенных процессов или их групп. Здесь и далее мы придерживаемся взглядов Д.А. Тимофеева на временные рамки понятия “современные геоморфологические процессы” и определяем последние как процессы рельефообразования, “доступные для непосредственного наблюдения и измерения не только с точки зрения их проявления в рельефе, но и других основных характеристик, в числе которых на первое место следует поставить количественную (инструментальную) и качественную (экспертную) оценку степени

интенсивности и скорости проявления того или иного процесса” (Горелов и др., 1990, с. 5).

Авторы данной статьи столкнулись с тем, что при работе на малых горных водосборах, не обеспеченных измерениями стока наносов или объема и возраста аккумулятивных тел (например, заполнения наносами озерных котловин) — невозможно сколько-нибудь точно оценить интенсивность денудации этих участков, скорость генерации на водосборах рыхлообломочного материала и т.д. Решение данной задачи дает “морфодинамический подход” — картографирование по полевым или дистанционным данным преобладающих по территории экзогенных процессов, присвоении им скоростей мобилизации материала за выбранный период времени и расчет [например, морфометрическими методами, см. (Cavalli et al., 2013)] коэффициента доставки наносов к замыкающему створу.

Наиболее слабым звеном в данной цепочке является определение скоростей мобилизации материала [денудация, ассоциированная с конкретными экзогенными процессами — в противовес “бассейновой” назовем ее “локальной”, вслед за (Pulina, 1974), по (Борсук и др., 1977)]. Безусловно, возможны и проводятся прямые измерения современных скоростей перемещения обломочного материала, в частности, с помощью полустационарного мониторинга с повторными съемками морфологии поверхности с БПЛА, наземных лазерных сканеров и т.д. Однако а) эти измерения носят весьма ограниченный по площади характер; б) часто не могут покрыть (в силу технических ограничений) весь спектр основных действующих экзогенных процессов. На текущий момент для заполнения пробелов в информации по скоростям экзогенных процессов — используются литературные данные для регионов, схожих в геолого-геоморфологическом и ландшафтно-климатическом отношении. Этот подход груб, но дает результаты в первом приближении [что уже неоднократно было нами проверено контрольными методами на водосборах Большого Кавказа — руч. Джанкуат, р. Донгуз-Орун, пруда Гитче-Гижит (Успенский и др., 2025; Харченко и др., 2023)].

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ

База данных о скоростях современных экзогенных процессов в горах (Modern Geomorphic Rates in Mountains MGRIM Database — MGRIM) является продолжением более ранних наших публикаций (Кедич и др., 2022; Харченко и др., 2021). Первоначально табличный формат базы был преобразован в веб-сайт, существенно дополнен конкретными наблюдениями и данными

¹ <https://octopusdata.org/> (дата обращения 10.03.2025).

о факторах скоростей экзогенных процессов. База реализована на технологии shiny и доступна по веб-адресу https://geomorphometry.shinyapps.io/geomorphic_rates2/. Она охватывает данные по интенсивности выветривания, ледниковой эрозии, обвальнo-осыпным процессам, крипу, плоскостному смыву, линейной эрозии, оползням, кроме того, в качестве данных для сравнения приводятся базы данных об интенсивности бассейновой денудации за разные временные интервалы: от современности (Hinderer et al., 2013) до позднего плейстоцена и голоцена (Delunel et al., 2020) по Альпам. Планируется дальнейшее расширение базы за счет показателей “селевой денудации” в разрезе селеопасных бассейнов разных горных систем и др. Для каждой группы процессов и каждого внесенного в базу показателя скорости приводятся характеристики потенциальных факторов развития экзогенных процессов — геолого-геоморфологических, климатических, ландшафтных. Это позволит в перспективе использовать данную базу для прогнозирования вероятных параметров скорости указанных экзогенных рельефообразующих процессов в горных регионах и проводить экспресс-оценку бюджета наносов для малых водосборов.

Думается, значительным рывком в развитии морфодинамического подхода к оценке денудации в горах было бы использование географически взвешенной регрессии для предсказания наиболее вероятных ожидаемых скоростей действия отдельно взятого экзогенного геоморфологического процесса — разных видов эрозии, склоновых процессов, ледниковой денудации и аккумуляции и т.д., а также эпизодических экстремальных явлений — оползней, селей, обвалов. Географически взвешенная регрессия, при наличии базы скоростей экзогенных процессов и данных об условиях/факторах их протекания, могла бы позволить для исследуемых водосборов получить не константные для очень разнородной площади, а переменные значения скоростей. Второе направление развития — классическая регрессия методами машинного обучения (в частности, random forest), в одной из предыдущих работ (Харченко, 2024) было показано, что с ее помощью можно предсказывать локальное понижение/повышение поверхности за счет водной эрозии и переотложения наносов на склонах и в днищах эрозионных форм, расположенных ниже по рельефу. Необходимо подчеркнуть, что крайне редкие катастрофические проявления экзогенных процессов в базу не включены, рассматриваются исключительно фоновые скорости — условно постоянных во времени экзогенных процессов (обычно составленные сериями частых эпизодических событий).

СКОРОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРАХ

Компиляция значительного объема материала о скоростях экзогенных процессов позволяет провести их первичный анализ.

Обвальнo-осыпные процессы своим триггером имеют воздействие силы тяготения (Шукин, 1960) Земли, в то время как материал для транспортировки либо подготавливается выветриванием, либо — для аккумулятивных склонов (например, моренных валов) — осыпанию подвергаются их слабо литифицированные поверхности. Данная группа экзогенных процессов покрыта в базе данных наиболее полно, соответствующий раздел насчитывает 420 измеренных значения скорости отступления гравитационных склонов. Среднее значение по всем наблюдениям составляет 1.5 мм/год (в горизонтальной плоскости, реже — по нормали к склону), медиана — лишь 0.5 мм/год. Такая диспропорция связана с редкими, но экстремальными значениями скоростей обвальнo-осыпных процессов. Среднеквадратическое отклонение по всему массиву данных — 21 мм/год, а максимальное значение — 81 мм/год, отвечающее темпам деградации сбросового уступа в районе вдхр. Хебген (Монтана, США), возникшего в результате мощного землетрясения 1959 г. (Wallace, 1980). Такие параметры интенсивности отступления характерны для одного фрагмента уступа (у руч. Cabin Creek) высотой до 5 м и крутизной склонов от 70° до отвесных. Среди причин экстремальных скоростей — литологический (автор полагает, что механизм отступления уступа не только в осыпании, но и в оплывании, в силу высокой насыщенности рыхлых моренных толщ глинистыми частицами), климатический — гумидный климат с выраженными сезонами и частыми переходами температуры через 0°C. При этом данные, полученные этим же автором тем же фототеодолитным методом для сбросовых уступов аридной Невады (США), заложенных в аллювиальных и коллювиальных толщах, показывают на 2 порядка меньшие скорости отступления уступов (Wallace, 1977). До 30 мм в год отступают за счет осыпания поверхности моренных валов в Непальских Гималаях по данным (Watanabe et al., 1998). При этом скорости отступления уступов с выходами коренных пород (рис. 1) характеризуются гораздо меньшими значениями. Максимальные значения для них находятся в диапазоне до 10–14 мм/год, получены на 1 объекте — в долине Upper Caunertal в Австрийских Альпах методом ловушек обломочного материала в основании склона (Vehling et al., 2019). Характерные значения скоростей



Рис. 1. Области сноса и аккумуляции обвального-осыпного материала на крутом скальном борту кара ледника Кой-авган (Кабардино-Балкария).

отступания склонов, сложенных коренными породами, — около 1 мм/год, и часто лимитируются интенсивностью выветривания.

В широких пределах изменяются интенсивности ледниковой экзарации для горных ледников. Так, при среднем значении 4.6 мм/год ($n = 95$), максимальные показатели составили 60 мм/год и были отмечены для ледника Марджери (Аляска) (Hallet et al., 1996). Среди основных факторов (рис. 2), влияющих на скорость мобилизации наносов — среднегодовая температура и суммарное количество осадков, скорость течения ледника, уклон его ложа и мощность толщи льда, а также характер подстилающих пород. Первые три фактора обуславливают 65% (44–81%, 95% CI) дисперсии показателя скорости ледниковой экзарации. Характер связей ожидаемо нелинейный, так при среднегодовой температуре 0°C и суммарном годовом количестве осадков 1000 мм скорость движения ледника 100 м/год обуславливает скорость экзарации 2 мм/год, а повышение скорости движения до 200 м/год — показывает рост интенсивности экзарации уже до около 5.5 мм/год. Повышение уклона ледникового ложа с 200

до 400 м/1 км приводит к увеличению скорости экзарации в 3–4 раза.

Интересен вклад в общую денудацию гор эпизодических, но регулярных процессов, вроде не катастрофических оползней, селевых потоков и т.д. Мониторинг их влияния на понижение поверхности также возможен, но затрудняется тем, что сами движения возникают периодически в разных местах, на разных склонах, в разных бассейнах. Поэтому их учет обычно ведется с осреднением на сколько-нибудь значительные интервалы времени и площади. Применительно к оползням, их вклад в комплексную денудацию гор оценивается с помощью показателя оползневой мобилизации вещества (landslide mobilization rate/LMR), выражаемом в единицах вертикальной скорости. В базе сведены 127 значения LMR со средней величиной 4 мм/год при медиане — 1 мм/год. Такая диспропорция связана с рядом крайне динамичных участков, где LMR может достигать 28 мм/год (Lin et al., 2008), 38 мм/год (Chen et al., 2015) — оба участка на острове Тайвань, 61 мм/год (Bennett et al., 2012) — в широко известной до-

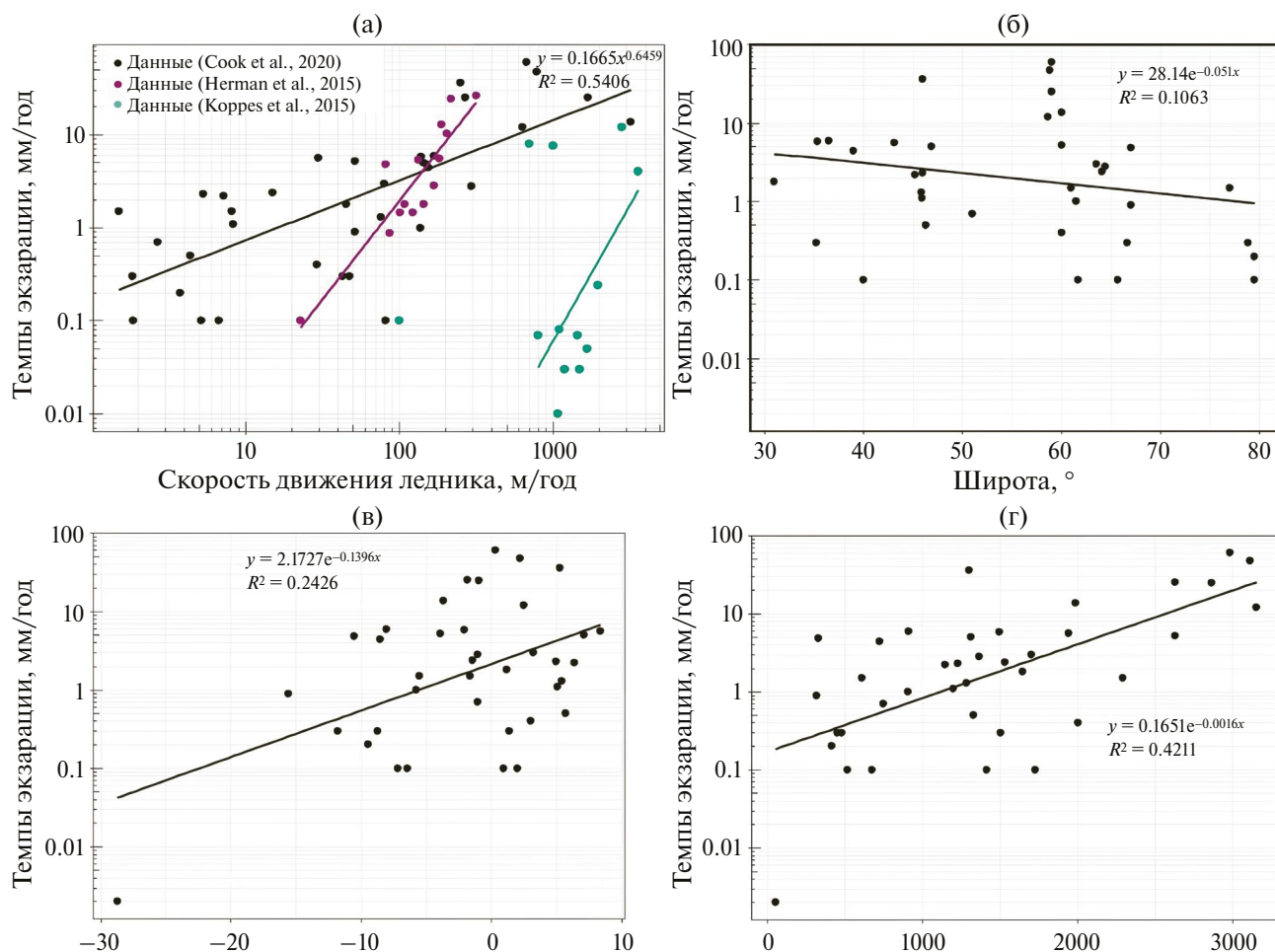


Рис. 2. Связь темпов эскарации со скоростью движения ледника (а), географической широтой (б), среднегодовой температурой (в) и среднегодовым количеством осадков (г).

Составлено по: (Cook et al., 2020).

лине Ильграбен в Швейцарских Альпах. Необходимо подчеркнуть, что это валовые скорости оползневой денудации в горах, не учитывающие переотложение значительной части обломочного материала ниже по склонам. В силу обычно небольшой дистанции транспортировки рыхлого материала оползнями, их фактический вклад в комплексную денудацию будет зависеть от того, вовлекается ли поставляемый ими материал в транспортировку иными процессами — эрозионными, селевыми (см. например, оползень Бузулган в окрестностях г. Тырнауз, Кабардино-Балкария), обвально-осыпными и т.д.

Наши исследования (Kedich et al., 2022) показывают, что часто определяющий вклад в бюджет наносов малых приледниковых водосборов вносит водная эрозия недавно освободившихся ото льда крутых склонов моренных валов. Скорость понижения поверхности этих валов (рис. 3) достигает 100 мм/год при крутизне склонов 50°–60°. Такие значительные объемы вещества даже при сравнительно малой

(в масштабах водосбора) площади мобилизации могут обеспечивать более половины всего выноса рыхлообломочного материала за пределы водосбора и, следовательно, основную часть общего понижения поверхности. Причем основным рельефообразующим процессом здесь является овражная эрозия, закладывающиеся по склонам линейные эрозионные формы быстро достигают размеров оврагов — до нескольких метров глубиной и шириной, и протяженностью в десятки, до сотни метров в зависимости от длины склонов. В базе данных помещены результаты 113 измерений скоростей понижения поверхности за счет овражной эрозии на подобных незакрепленных растительностью склонах. При среднем значении 68 мм/год и медиане 46 мм/год, эти скорости также значительно варьируют со среднеквадратическим отклонением 76 мм/год. Максимальные из зарегистрированных значений понижения поверхности заовраженных склонов — 430 и 465 мм/год выявлены в итальянских Альпах (Betz-Nutz et al., 2023; Altmann et al., 2024), в Южном Тироле. Эти скорости были отмечены для этапа, непосредственно



Рис. 3. Активно размываемый овражной эрозией вал боковой морены ледника Джанкуат (Кабардино-Балкария).

последовавшего за дегляциацией наблюдаемых склонов (50–70-е годы XX в.), и связываются авторами не только с овражной эрозией в чистом виде, но и с оползнями и отседаниями склонов, спровоцированными вытаиванием мертвого льда в ядрах моренных валов.

Крайне немногочисленны и при этом очень разнообразны результаты измерений скорости плоскостного смыва в горных несельскохозяйственных районах (рис. 4), при среднем значении скорости понижения поверхности 2 мм/год, медиана составляет лишь 0.054 мм/год. Различие в 37 раз обуславливается редкими локальными примерами очень активной работы плоскостного смыва, при том, что в среднем он вносит незначительный вклад в динамику рельефа гор. Максимальные зарегистрированные значения составляют 2.17 см/год (Lam, 1977) на бедлендах водосбора водохранилища Тай-Лам-Чун (среднее значение по 449 участкам). Интенсивность плоскостного смыва в значительной степени определяется крутизной поверхности (наряду с проективным покрытием растительности и механическими свойствами почвы). Однако работы, где были скомпилированы оба показателя —

и понижение поверхности за счет плоскостного смыва, и крутизна вышележащих склонов (например, Leigh, 1982), показывают, что рост интенсивности смыва с ростом крутизны происходит до некоторого предела, порядка 10° – 15° , а дальше скорость этого процесса снижается. Это можно объяснить комплексом причин, среди которых следующие — на более крутых склонах плоскостная эрозия скорее переходит в линейный размыв, более крутые склоны часто сложены менее эрозионно податливыми породами, нежели сравнительно пологие.

Генерализованные характеристики данных по скоростям отдельных групп экзогенных геоморфологических процессов в горах приведены в табл. 1.

В базе данных и данной статье рассмотрены не все группы экзогенных геоморфологических процессов в горах. За скобками остаются карстовые процессы, частично учтенные в разделе о выветривании. Пока не учтена “селевая денудация” (Черноморец, 2005), то есть вклад селевых процессов в направленное понижение рельефа гор, хотя по аналогии с *landslide mobilization rate* такой учет становится не только возможен, но и



Рис. 4. Стационар по мониторингу плоскостного смыва и речевой эрозии на крутом аструктурном склоне Скалистого Хребта (Кабардино-Балкария).

категорически необходим. Ряд исследований показывает, что, в зависимости от конкретного бассейна, вклад селей в комплексную денудацию варьирует практически от 0–10 до 90–100% (Berger et al., 2011). Не затронутой остается эрозионная работа постоянных водотоков, хотя, в зависимости от подстилающих пород, зачастую — весьма значительная (Никонов, 1973). Не затронута совершенно пока рельефообразующая деятельность лавин (Luckman, 1977).

Перспективными направлениями развития базы данных являются следующие:

- 1) продолжение наполнения ее информацией наблюдениями за скоростями проявления экзогенных геоморфологических процессов по собственным исследованиям и анализу литературы;
- 2) наполнение интерфейса базы инструментарием для анализа табличной и геопрограммной информации;
- 3) частичное смещение акцентов с полевых наблюдений и измерений на методы дистанционного зондирования Земли, некоторые из которых уже сейчас позволяют получать скорости смещения поверхности с субанти-

метровой точностью. Дополнение этих данных геоморфологической интерпретацией, данными о механизме процессов — задача геоморфологов;

- 4) проработка вопросов экстраполяции значений скоростей экзогенных геоморфологических процессов на региональный уровень методами машинного обучения, применение базы в задачах изучения бюджетов наносов горных водосборов.

ВЫВОДЫ

Разработанная и представленная в этой статье открытая база данных скоростей современных экзогенных геоморфологических процессов в горах (MGRIM Database) представляет собой шаг вперед в динамической геоморфологии. Это попытка заполнить пробел в доступности систематизированной информации о скоростях локальной денудации, ассоциированной с конкретными процессами рельефообразования, такими как обвально-осыпная деятельность, ледниковая экзарация,

Таблица 1. Скорости экзогенных геоморфологических процессов и факторы, их обуславливающие, согласно базе данных MGRIM (по состоянию на май 2025 г.)

Экзогенный процесс	Число наблюдений, шт.	Средняя скорость* ($\pm$ СКО)	Медиана скорости	Максимальная скорость	Факторы
Выветривание	68	44 ± 71 мм/тыс. лет	16.5 мм/тыс. лет	400 мм/тыс. лет	Климат, петрография/литология, биота
Ледниковая экарация	95	4.6 ± 9.6 мм/год	1.5 мм/год	60 мм/год	Климат, рельеф ледникового ложа, морфология и динамика ледника, подстилающие породы
Обвальнo-осыпные процессы	418	1.5 ± 5 мм/год	0.4 мм/год	81.5 мм/год	Литология/петрография, морфология склонов, климат
Оползни	127	4.2 ± 8.1 мм/год	1 мм/год	61 мм/год	Геологическое строение (характер пород, их залегание), морфология склонов, климат
Крип и солифлюкция	68	17 ± 43 см ³ /см · год	3.2 см ³ /см · год	200 см ³ /см · год	Механический состав субстрата, морфология склонов, климат, мерзлота
Плоскостной смыв	35	2 ± 4 мм/год	0.05 мм/год	17 мм/год	Механический состав субстрата, поверхностный сток, растительность, морфология склонов
Овражная эрозия	113	68 ± 79 мм/год	49 мм/год	465 мм/год	Механический состав субстрата, поверхностный сток, морфология склонов

Примечание: * все показатели скоростей даны для наибольшей части выборки с однородными единицами измерения. Например, скорости выветривания даны в мм/тыс. лет ($n = 47$), мг/л ($n = 10$) для ионного стока в ледниковых ручьях и т.д. В этом случае значения скоростей будут даны для части выборки, охарактеризованной скоростями в мм/тыс. лет, как наиболее обширной группе.

оползни, овражная эрозия, плоскостной смыв, крип и выветривание.

База MGRIM аккумулирует около 1000 записей (по состоянию на май 2025 г.) о скоростях экзогенных процессов, собранных из разнообразных литературных источников и результатов собственных исследований авторов. Это первый в своем роде ресурс, фокусирующийся именно на локальных скоростях отдельных экзогенных процессов в горных условиях, в отличие от существующих баз данных по осредненной “бассейновой” денудации (например, OSTORUS). Реализация базы в виде веб-сервиса обеспечивает не только свободный доступ к данным (включая их скачивание в табличном формате), но и возможности интерактивной визуализации (картографическое отображение точек наблюдений на топооснове или спутниковом снимке).

Каждая запись содержит детальную информацию о местоположении, методах и длительности мониторинга, природных условиях (геология, геоморфология, климат, ландшафт), что позволяет пользователям оценивать контекст полученных значений скоростей и проводить сравнительный анализ. Предусмотренный механизм волонтерского пополнения базы заинтересованными специалистами обеспечивает ее постоянное развитие и актуализацию, увеличивая репрезентативность данных для разных горных регионов мира.

База MGRIM является основой для экспресс-оценки интенсивности комплексной денудации и ее пространственной дифференциации в пределах речных бассейнов, конструирования схем бюджетов наносов малых водосборов.

Первичный анализ данных, скомпилированных в базе, подтверждает чрезвычайно высокую

пространственно-временную изменчивость скоростей экзогенных процессов в горах. Наблюдаются значительные различия как между разными типами процессов, так и внутри каждой группы. Эта изменчивость четко контролируется комплексом факторов: литологией/петрографией пород с поверхности, морфологией склонов, климатическими параметрами (температура, осадки) и динамикой конкретных агентов (например, скорость движения ледника).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-17-00143: “Экзогенная геоморфодинамика российской части Большого Кавказа в антропоцене”.

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project no. 25-17-00143: “Exogenous Geomorphodynamics of the Russian Part of the Greater Caucasus in the Anthropocene.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борсук О.А., Спасская И.И., Тимофеев Д.А. Вопросы динамической геоморфологии. М.: ВИНТИ АН СССР, 1977. 151 с.
- Горелов С.К., Граве М.К., Козлова А.Е., Тимофеев Д.А. Карта современных геоморфологических процессов СССР масштаба 1 : 2 500 000 // Геоморфология. 1990. № 1. С. 4–14.
- Кедич А.И., Голосов В.Н., Харченко С.В. Экзогенные процессы в прогляциальных зонах гор: количественные оценки и их точность // Уч. записки Казанского гос. ун-та, Сер. Естественные науки. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2022. Т. 164. № 1. С. 109–134.
- Никонов А.А. Определение скорости врезания рек // Геоморфология. 1973. № 1. С. 24–35.
- Успенский М.И., Харченко С.В., Цыпленков А.С., Иванов М.М., Голосов В.Н. Современная денудация малого приледникового водосбора озера Донгуз-Орун // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2025. Т. 80. № 4. С. 95–109.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.9>
- Харченко С.В. Регрессионные методы в предсказании локальных скоростей современной денудации в горах // Сб. статей по матер. XIV Всерос. конф. молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. М.: Географический ф-тет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2024. С. 85–89.
- Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С., Федин А.В., Успенский М.И. Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижгит) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2023. Т. 78. № 3. С. 38–51.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.4>
- Харченко С.В., Федин А.В., Голосов В.Н. Темпы денудации в перигляциальных областях высокогорий: методы и результаты исследований // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 1. С. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0435428121010065>
- Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с.
- Шукин И.С. Общая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1960. Т. I. 615 с.
- Altmann M., Pfeiffer M., Haas F., Rom J., Fleischer F., Heckmann T., Piermattei L., Wimmer M., Braun L., Stark M., Betz-Nutz S., Becht M. Long-term monitoring (1953–2019) of geomorphologically active sections of Little Ice Age lateral moraines in the context of changing meteorological conditions // Earth Surf. Dyn. 2024. Vol. 12. № 1. P. 399–431.
- Bennett G.L., Molnar P., Eisenbeiss H., Mcardell B.W. Erosional power in the Swiss Alps: characterization of slope failure in the Illgraben // Earth Surf. Process. Landforms. 2012. № 37. P. 1627–1640.
- Berger C., McArdell B.W., Schlunegger F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities // Geomorphology. 2011. № 125 (3). P. 421–432.
- Betz-Nutz S., Heckmann T., Haas F., Becht M. Development of the morphodynamics on Little Ice Age lateral moraines in 10 glacier forefields of the Eastern Alps since the 1950s // Earth Surf. Dyn. 2023. Vol. 11. № 2. P. 203–226.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments // Geomorphology. 2013. № 188. P. 31–41.
- Chen C.W., Saito H., Oguchi T. Rainfall intensity–duration conditions for mass movements in Taiwan // Prog. Earth Planet. Sci. 2015. № 2. P. 1–13.
- Cook S.J., Swift D.A., Kirkbride M.P., Knight P.G., Waller R.I. The empirical basis for modelling glacial erosion rates // Nat. Commun. 2020. № 11. Art. 759.
- Delunel R., Schlunegger F., Valla P.G., Dixon J., Glotzbach C., Hippe K., Kober F., Molliex S., Norton K.P., Salcher B., Wittmann H., Akçar N., Christl M. Late-Pleistocene catchment-wide denudation patterns across the European Alps // Earth-Sci. Rev. 2020. № 211. P. 103407.
- Goudie A. The Changing Earth: Rates of Geomorphological Processes. Oxford: Blackwell, 1995. 302 p.
- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications // Glob. Plan. Change. 1996. № 12. P. 213–235.

- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F.* River loads and modern denudation of the Alps—A review // *Earth-Sci. Rev.* 2013. № 118. P. 11–44.
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A., Golosov V.* Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics // *Geomorphology*. 2023. Vol. 441. P. 108896.
- Kukal Z.* The rate of geological processes // *Earth-Sci. Rev.* 1990. № 28. P. 73–82.
- Lam K.-C.* Patterns and rates of slopewash on the badlands of Hong Kong // *Earth Surf. Process.* 1977. № 2 (4). P. 319–332.
- Leigh C.* Sediment transport by surface wash and through-flow at the Pasoh Forest Reserve, Negri Sembilan, Peninsular Malaysia // *Geogr. Ann. Ser. A, Phys. Geogr.* 1982. № 64 (3–4). P. 171–180.
- Lin G.W., Chen H., Hovius N., Horng M.J., Dadson S., Meunier P., Lines M.* Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment // *Earth Surf. Process. Landf.* 2008. № 33 (9). P. 1354–1373.
- Luckman B.H.* The geomorphic activity of snow avalanches // *Geogr. Ann. Ser. A.* 1977. № 59 (1–2). P. 31–48.
- Pulina M.* Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego. Wrocław: Prace Geograficzne PAN, 1974. 160 p.
- Vehling L., Rohm J., Moser M.* Rockfall at proglacial rockwalls — A case study from the Kaunertal, Austria / *Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. Cham: Springer, 2019. P. 143–156.
- Wallace R.E.* Degradation of the Hebgen Lake fault scarps of 1959 // *Geology*. 1980. № 8 (5). P. 225–229.
- Wallace R.E.* Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1977. № 88 (9). P. 1267–1281.
- Watanabe T., Dali L., Shiraiwa T.* Slope denudation and the supply of debris to cones in Langtang Himal, Central Nepal Himalaya // *Geomorphology*. 1998. № 26 (1–3). P. 185–197.

Collection of the Rates of Recent Exogenous Geomorphic Processes in Mountains in an Open Database

S. V. Kharchenko^{a, b, *} and M. I. Uspenskii^{a, **}

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^b*Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia*

**e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru*

***e-mail: maksimuspenskii@gmail.com*

A continuously updatable database on the rates of exogenous geomorphological processes in mountainous conditions has been developed. It is hosted at the web address: https://geomorphometry.shinyapps.io/geomorphic_rates2/. The database includes about one thousand records on the rates of weathering, glacial exaration, landslide and scree processes, slow mass movements of unconsolidated cover, landslides, sheet and gully erosion. Although the dataset is constantly being supplemented by the authors, the possibility for volunteer participation in its population by interested specialists is provided. The idea behind creating this project is to give geomorphologists a tool for an approximate assessment of possible rates of exogenous processes for arbitrary mountainous territories, based on data on a combination of factors and known rates of their action in similar natural conditions. Knowledge of these rates underlies rapid assessment methods for the intensity of complex denudation within river basins and its geographical differentiation, as well as for analyzing sources of clastic material entering watercourses and reservoirs and constructing sediment budget schemes. Therefore, all records contain data on the location of monitoring sites, the duration and methods used, natural conditions and factors, as well as the actual rate indicators. All data are available for free download in Excel format and can also be visualized by the geographical location of observation sites on a map (OpenTopoMap) or a satellite image (ESRI Imagery). Plans include supplementing the database with data on denudation rates associated with debris flow processes, as well as on riverbanks and riverbed erosion.

Keywords: denudation, open database, web service, Alps, Caucasus, geomorphic processes

REFERENCES

- Altmann M., Pfeiffer M., Haas F., Rom J., Fleischer F., Heckmann T., Piermattei L., Wimmer M., Braun L., Stark M., Betz-Nutz S., Becht M. Long-term monitoring (1953–2019) of geomorphologically active sections of Little Ice Age lateral moraines in the context of changing meteorological conditions. *Earth Surf. Dyn.*, 2024, vol. 12, no. 1, pp. 399–431.

- Bennett G.L., Molnar P., Eisenbeiss H., Mcardell B.W. Erosional power in the Swiss Alps: Characterization of slope failure in the Illgraben. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2012, no. 37, pp. 1627–1640.
- Berger C., Mcardell B.W., Schlunegger F. Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the time scales of debris flow activities. *Geomorphology*, 2011, vol. 125, no. 3, pp. 421–432.
- Betz-Nutz S., Heckmann T., Haas F., Becht M. Development of the morphodynamics on Little Ice Age lateral moraines in 10 glacier forefields of the Eastern Alps since the 1950s. *Earth Surf. Dyn.*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 203–226.
- Borsuk O.A., Spasskaya I.I., Timofeev D.A. *Voprosy dinamicheskoi geomorfologii* [Questions of Dynamic Geomorphology]. Moscow: VINITI AN SSSR, 1977. 151 p.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 2013, vol. 188, pp. 31–41.
- Chen C.W., Saito H., Oguchi T. Rainfall intensity–duration conditions for mass movements in Taiwan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2015, vol. 2, pp. 1–13.
- Cook S.J., Swift D.A., Kirkbride M.P., Knight P.G., Waller R.I. The empirical basis for modelling glacial erosion rates. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, art. 759.
- Chernomorets S.S. *Selevye ochagi do i posle katastrof* [Origination Sites of Debris Flow Disasters: Before and After]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2005. 184 p.
- Delunel R., Schlunegger F., Valla P.G., Dixon J., Glotzbach C., Hippe K., Kober F., Molliex S., Norton K.P., Salcher B., Wittmann H., Akçar N., Christl M. Late-Pleistocene catchment-wide denudation patterns across the European Alps. *Earth-Sci. Rev.*, 2020, vol. 211, art. 103407.
- Gorelov S.K., Grave M.K., Kozlova A.E., Timofeev D.A. Map of present-day geomorphologic processes: scale 1:2500000. *Geomorphol.*, 1990, no. 1, pp. 4–14. (In Russ.).
- Goudie A. *The Changing Earth: Rates of Geomorphological Processes*. Oxford: Blackwell, 1995. 302 p.
- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications. *Glob. Plan. Change*, 1996, vol. 12, pp. 213–235.
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps — A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2013, vol. 118, pp. 11–44.
- Kedich A.I., Golosov V.N., Kharchenko S.V. Surface processes in mountainous proglacial areas: Quantitative assessments and their accuracy. *Uchen. Zap. Kazansk. Univ. Ser. Estestv. Nauki*, 2022, vol. 164, no. 1, pp. 109–134. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2022.1.109-134>
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A., Golosov V. Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics. *Geomorphology*, 2023, vol. 441, art. 108896.
- Kharchenko S.V. Regression methods in predicting local rates of modern denudation in mountains. In *Sbornik statei po materialam XIV Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh vuzov, ob'edinyayemykh Mezhevuzovskim nauchno-koordinatsionnym sovetom po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov* [Proceedings of the 14th All-Russian Conf. of Young University Scientists, United by the Interuniversity Scientific Coordination Council on the Problem of Erosion, Channel and Estuary Processes]. Moscow: Geogr. Fakul'tet MGU, 2024, pp. 85–89. (In Russ.).
- Kharchenko S.V., Fedin A.V., Golosov V.N. Denudation rates in the mountain periglacial regions: Research methods and results. *Geomorphol.*, 2021, vol. 52, no. 1, pp. 3–18. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0435428121010065>
- Kharchenko S.V., Golosov V.N., Tsyplenkov A.S., Fedin A.V., Uspensky M.I. Rates of modern denudation of a small catchment in the middle mountain belt of the Greater Caucasus (case study of the Gitche-Gizhgit catchment). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, pp. 38–51. (In Russ.).
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.4>
- Kukul Z. The rate of geological processes. *Earth-Sci. Rev.*, 1990, vol. 28, pp. 73–82.
- Lam K.-C. Patterns and rates of slopewash on the badlands of Hong Kong. *Earth Surf. Process.*, 1977, vol. 2, no. 4, pp. 319–332.
- Leigh C. Sediment transport by surface wash and through-flow at the Pasoh Forest Reserve, Negri Sembilan, Peninsular Malaysia. *Geogr. Ann. Ser. A.*, 1982, vol. 64, no. 3–4, pp. 171–180.
- Lin G.W., Chen H., Hovius N., Horng M.J., Dadson S., Meunier P., Lines M. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2008, vol. 33, no. 9, pp. 1354–1373.
- Luckman B.H. The geomorphic activity of snow avalanches. *Geogr. Ann. Ser. A.*, 1977, vol. 59, no. 1–2, pp. 31–48.
- Nikonov A.A. The defining of the rates of river cutting-down. *Geomorphol.*, 1973, no. 1, pp. 24–35. (In Russ.).
- Pulina M. *Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego* [Chemical Denudation on the Carbonate Karst Areas]. Wrocław: Prace Geograficzne PAN, 1974. 160 p.

- Shchukin I.S. *Obshchaya geomorfologiya. Tom I* [General Geomorphology. Vol. I]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1960. 615 p.
- Uspenskii M.I., Kharchenko S.V., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.M., Golosov V.N. Modern denudation of a small proglacial catchment of Lake Donguz-Orun. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2025, no. 4 (In Russ.). (In press).
- Vehling L., Rohn J., Moser M. Rockfall at proglacial rockwalls — A case study from the Kaunertal, Austria. In *Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. Cham: Springer, 2019, pp. 143–156.
- Wallace R.E. Degradation of the Hebgen Lake fault scarps of 1959. *Geology*, 1980, vol. 8, no. 5, pp. 225–229.
- Wallace R.E. Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 9, pp. 1267–1281.
- Watanabe T., Dali L., Shiraiwa T. Slope denudation and the supply of debris to cones in Langtang Himal, Central Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 1998, vol. 26, no. 1–3, pp. 185–197.