

# АНАЛИЗ ПОРОГОВОГО СООТНОШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОСАДКОВ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ В ВЕРХОВЬЯХ ДОЛИНЫ РЕКИ АЛАКНАНДА

БХАТТАЧАРДЖИ С.

Индийский институт дистанционного зондирования, г. Дехрадун, шт. Уттаракханд, Индия

soumiya940@gmail.com

РЭЙ Ч.П.К.

Индийский институт дистанционного зондирования, г. Дехрадун, шт. Уттаракханд, Индия

Champati\_ray@iirs.gov.in

ЧАТТОРАДЖ Ш.Л.

Индийский институт дистанционного зондирования, г. Дехрадун, шт. Уттаракханд, Индия

shovan@iirs.gov.in

ДХАРА М.

Индийский институт дистанционного зондирования, г. Дехрадун, шт. Уттаракханд, Индия

mrinmoy0907@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный и адаптированный перевод статьи исследователей из Индийского института дистанционного зондирования «Анализ порогового соотношения интенсивности и длительности осадков для возникновения оползней в верховьях долины реки Алакнанда» (Bhattacharjee, 2017). Эта работа была опубликована в журнале *International Journal of Geological and Environmental Engineering* («Международном журнале по инженерной геологии и инженерным методам охраны окружающей среды») и находится в открытом доступе на сайте издательства WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology – «Всемирной академии наук, техники и технологий») по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет распространять, микшировать, адаптировать, переводить и использовать (даже в коммерческих целях) статьи при условии указания типов изменений и ссылок на первоисточники. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Bhattacharjee, 2017) приведена в конце.

Известно, что по всему Гималайскому хребту происходят оползни, вызываемые дождями. Основная цель представленного исследования – определение пороговой для инициирования оползней корреляционной связи между максимальной интенсивностью дождевых осадков в день возникновения оползня  $I$  (мм/ч) и длительностью непрерывного дождя до оползневого события  $D$  (ч), поскольку такую связь можно использовать в качестве важного компонента системы раннего предупреждения об оползневой опасности. Работа выполнялась для территории вдоль участка Федеральной Автомагистрали 58 (National Highway 58, или NH-58) между городами Карнапраяг и Бадринах в Гархвальских Гималаях – горных хребтах в штате Уттаракханд на севере Индии.

В качестве основного источника данных по атмосферным осадкам были использованы обработанные результаты измерений интенсивности дождей через каждые 3 часа и их продолжительности по ежедневным наблюдениям, которые были выполнены с помощью американо-японского спутника TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission – «Миссия по измерению тропических осадков»). Также использовались данные по оползням, полученные в 2013 и 2014 годах Организацией приграничных дорог (Border Road Organization, BRO) – инженерным корпусом индийской армии, который разрабатывает и поддерживает дорожные сети в приграничных районах Индии и дружественных ей соседних странах. Плюс ко всему применялись некоторые вспомогательные данные по инвентаризации оползней в 2013 и 2014 годах.

Эмпирически было получено уравнение, описывающее пороговую для инициирования оползня корреляционную связь « $I - D$ ». Была проанализирована достоверность этого уравнения. Точность полученных с его помощью прогнозов для оползней на исследуемой территории составляла до 70%.

Был сделан вывод, что указанное уравнение может быть использовано для прогноза возможного возникновения оползней в исследуемом районе и работать как часть системы раннего предупреждения об оползневой опасности. При этом полученные результаты можно значительно улучшить с помощью наземных оценок по дождевым осадкам и уточненной и расширенной базы данных по оползням.

Представленная работа демонстрирует очень недорогой метод получения информации о возможности схода оползней в любом регионе. Этот метод может обеспечить своевременное предупреждение об опасности и более высокую готовность к смягчению последствий оползневых явлений.

Консультационную помощь при подготовке данного перевода оказали специалисты группы компаний «ТРУМЕР», которая специализируется на оценке рисков опасных природных процессов и защите от них.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползень; корреляция «интенсивность – продолжительность»; пороговое количество осадков; «Миссия по измерению тропических осадков»; склон; инвентаризация; система раннего предупреждения.

#### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бхаттачарджи С., Рэй Ч.П.К., Чатторадж Ш.Л., Дхара М. Анализ порогового соотношения интенсивности и длительности осадков для возникновения оползней в верховьях долины реки Алакнанда // Геоинфо. 2023. Т. 5. № 8. С. 6–13 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-8-6-13

## PRECIPITATION INTENSITY: DURATION BASED **THRESHOLD ANALYSIS** FOR INITIATION OF LANDSLIDES IN UPPER ALAKNANDA VALLEY

#### **BHATTACHARJEE S.**

Indian Institute of Remote Sensing,  
Dehradun, Uttarakhand, India  
soumiya940@gmail.com

#### **RAY P.K.Ch.**

Indian Institute of Remote Sensing,  
Dehradun, Uttarakhand, India  
Champati\_ray@iirs.gov.in

#### **CHATTORAJ Sh.L.**

Indian Institute of Remote Sensing,  
Dehradun, Uttarakhand, India  
shovan@iirs.gov.in

#### **DHARA M.**

Indian Institute of Remote Sensing,  
Dehradun, Uttarakhand, India  
mrinmoy0907@gmail.com

#### **ABSTRACT**

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Precipitation intensity: duration based threshold analysis for initiation of landslides in Upper Alaknanda Valley” by researchers from the Indian Institute of Remote Sensing (Bhattacharjee, 2017). This paper was published in the International Journal of Geological and Environmental Engineering. It is an open access article that is available on the website of the WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology) publisher under the CC BY 4.0 license that allows it to be copied, distributed, translated, adapted, modified, mixed and used for any purposes (even commercial ones) provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the reference to the original paper (Bhattacharjee, 2017) is in the end.

The entire Himalayan range is globally renowned for rainfall-induced landslides. The prime focus of the presented study was to determine the threshold (for initiating landslides) correlation between the maximal rainfall intensity on the day of a landslide event  $I$  (mm/h) and the continuous rain duration before the landslide event  $D$  (h), because such a relationship can be used as an important component of an early warning system. The work was carried out for the territory along the section of the National Highway 58 (NH-58) between the cities of Karnaprayag and Badrinath in the Garhwal Himalayas (mountain ranges in the state of Uttarakhand in the north of India).

Postprocessed data on rainfall intensity and duration according to 3-hourly and daily observations correspondingly (on the base of the US-Japanese TRMM satellite observations) were used as the prime source of precipitation data. The landslide data obtained in 2013 and 2014 by the Border Road Organization (BRO) and some ancillary landslide inventory data for 2013 and 2014 were also used.

An empirical equation of the threshold (for initiating a landslide) “ $I - D$ ” correlation was obtained. The validation of this equation was performed. The accuracy of the forecasts obtained using this equation for landslides in the study area was up to 70%.

It was inferred that this equation can be used to predict possible landslide events in the study area and can work as a part of an early warning system. Besides, the obtained results can be significantly improved with the help of ground-based rainfall estimates and a better database on landslide records.

The presented paper demonstrates a very low cost method to get information on the possibility of impending landslides in any region. This method can provide alert and better preparedness for landslide disaster mitigation.

#### KEYWORDS:

landslide; "intensity-duration" correlation; rainfall threshold; Tropical Rainfall Measuring Mission; slope; inventory; early warning system.

#### FOR CITATION:

Bhattacharjee S., Ray P.K.Ch., Chattoraj Sh.L., Dhara M. Analiz porogovogo sootnosheniya intensivnosti i dlitel'nosti osadkov dlya vozniknoveniya opolzney v verkhov'yah doliny reki Alaknanda [Precipitation intensity: duration based threshold analysis for initiation of landslides in Upper Alaknanda Valley] (translated from English into Russian) // *GeoInfo*. 2023. T. 5. № 8. S. 6–13 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-8-6–13 (in Rus.).

#### Введение ►

Оползень – это движение массы скальных, обломочных или дисперсных грунтов вниз по склону под действием силы тяжести [1].

Дождевые осадки являются причиной многих опасностей и событий, которые плохо влияют на повседневную жизнь человека, и оползни являются одними из них.

Атмосферные осадки играют важную роль в возникновении оползней, поскольку они увеличивают влажность грунтовых массивов, что увеличивает поровое давление воды, способствует выветриванию и набуханию глинистых грунтов и, проще говоря, разрушает слагающие склон материалы. Поэтому при достаточной крутизне склона могут возникнуть оползни.

Другие важные факторы включают геологию и геоморфологию, от которых также зависит устойчивость или неустойчивость склонов.

Рост урбанизации и развитие дорожных сетей также увеличивают нагрузку на ландшафты и приводят к повышению степени их уязвимости.

Уничтожение лесов и изменения в землепользовании и растительном покрове также способствуют разрушению верхний слоев грунтовых массивов, увеличивая их подверженность оползням [2].

Концепция порогового для возникновения оползня количества осадков, представленная Кейном [3], основана на более раннем выявлении Кэмпбеллом [4] связи между их высокой интенсивностью и возникновением неглубоких оползней и на предположении Старкея [5] о том, что критическое количество осадков зависит от комбинации их интенсивности и продолжительности. Пороговые количества осадков, которые рассматривались как провоци-

рующий фактор для схода неглубоких оползней, также использовались для систем предупреждения об оползнях и их показателях [6].

Неудивительно, что эти пороги сильно различаются по данным из разных источников и в зависимости от геологических условий.

Данные об осадках в режиме реального времени могут быть интегрированы с их пороговыми для возникновения оползней количествами, что может использоваться в системах предупреждения, как было продемонстрировано для территории Гонконга [7, 8].

Интенсивные осадки рассматриваются как провоцирующий фактор для неглубоких оползней, которые широко распространены по всему миру, и эта тема является сложной и широко обсуждаемой [9]. Инфильтрация дождевых осадков в неводонасыщенных условиях может уменьшить всасывание (всасывающее давление) влаги грунтом. Однако, как правило, этот процесс не рассматривается как способный вызвать селевые потоки. Как известно, результаты многих исследований показывают, что сель возникает из-за положительного порового давления воды, которое впоследствии влияет на водопроницаемость материала [10].

При исследованиях оползней широко применялись методы дистанционного зондирования, где использовалась спектральная и пространственная информация, которую можно было извлечь из полученных изображений [11].

Различные исследователи [12] в целях выявления возможности схода неглубоких оползней во время ожидаемых ежедневных дождей рекомендуют применять для оценки устойчивости склонов цифровые модели рельефа (ЦМР), что очевидно для пространственного уточнения используемых по-

роговых значений количества осадков. Причина в том, что данные об осадках, полученные с помощью радара и оптически уточненные до шага пикселя в 1 км, позволяют предположить, что предупреждения о возможных оползнях могут быть основаны на оценках количества осадков в режиме, близком к режиму реального времени, в сочетании с наборами пространственных данных по топографии и др.

Работа авторов настоящей статьи включала интерпретацию изображений и инвентаризацию крупных оползней. При этом для обнаружения оползней и распознавания неустойчивых и устойчивых зон учитывалась информация по пространственной протяженности, текстуре и спектрам. В целом, целью представленного исследования был анализ пороговой для возникновения оползней корреляционной связи между интенсивностью и длительностью дождевых осадков.

#### Исследуемый район и его геологические условия ►

Бассейн реки Алакнанда в индийском штате Уттаракханд характеризуется глубокими ущельями, скалистыми горами и очень сильно пересеченным рельефом. Там высока частота возникновения оползней – в основном в сезон дождей.

Была исследована территория вдоль части Федеральной Автомагистрали 58 (National Highway 58, или NH-58), которая имеет протяженность 126 км и проходит вдоль реки Алакнанда между городами Карнапраяг и Бадринах. Эта дорога была построена с применением выемки различных грунтов на склонах, включая аллювиальные (речных террас), флювиогляциальные, осыпные отложения и массивные и трещиноватые скальные породы. Вдоль указанной ав-

томагистрали на склонах долины обычно возникают и застраиваются небольшие города и другие населенные пункты. Строительство данной дороги вместе с быстрой урбанизацией, по-видимому, сделали прилегающие к ней неустойчивые склоны более предрасположенными к разрушениям.

Был изучен бассейн реки Алакнанда, простирающийся от 29°58'11,315" с.ш. до 31°6'21,183" с.ш. и от 78°32'31,406" в.д. до 80°17'26,161" в.д. Он охватывает важные места и речные бассейны, такие как Чамоли, Мандакини, Бадринагх, Пиндар, Дхаулиганга, Девпраяг и Бирехиганга. Далее был проведен анализ пороговой для возникновения оползней корреляции между интенсивностью и длительностью осадков для восьми основных участков территории вдоль рассматриваемой части NH-58 [13].

Исследуемая территория характеризуется глубокими ущельями и скалистыми горами с максимальной высотой 7811 м и минимальной высотой 445 м по отношению к среднему уровню моря (на основании данных национальной индийской цифровой модели рельефа CartoDEM, созданной по стереоданным, полученным при съемке с индийского же спутника Cartosat-1). Здесь во время муссонных дождей часто происходят разрушения склонов, причем в основном вдоль NH-58. Оползни на данной территории случаются из-за интенсивных дождей, сложной тектонической обстановки, уникальной геоморфологии крутых склонов и сильной пересеченности рельефа.

В геологическом отношении долина реки Алакнанда сложена тремя основными литостратиграфическими единицами, известными как дхухатольская (Dhudhatoli), гархвальская (Garhwal) и центральная кристаллическая (Central Crystalline) группы.

Зона вокруг города Девпраяг (и одноименного места слияния рек Бхагиратха и Алакнанда, образующих реку Ганг) состоит из метаморфических пород, в частности филлитов и кварцитов, образующих дхухатольскую группу, которая разделена Североалморским (North Almora) надвигом, простирающимся в направлении СЗ-ЮВ.

Скальные породы гархвальской группы обнажены к югу от города Джошимат и места Вишнупраяг (где сливаются реки Дхаулиганга и Алакнанда). Это в основном кварциты, глинистые сланцы, аспидные (грифельные) сланцы, кристаллические сланцы и карбонаты, ино-

гда прорванные метавулканическими породами. Гархвальская группа отделена от центральной кристаллической группы Главным центральным надвигом, проходящим в направлении СЗ-ЮВ и состоящим из нескольких зон сдвигов и разломов.

Северная зона, простирающаяся от юга Вишнупраяга до деревни Мана вдоль рек Алакнанда и Дхаулиганга, состоит из кристаллических сланцев, гнейсов и гранитов центральной кристаллической группы, которая залегает над гархвальской группой. Замечено, что надвиговые зоны имеют общее направление СЗ-ЮВ, параллельное Гималайскому хребту и перпендикулярное реке Алакнанда, текущей в направлении СВ-ЮЗ [14].

### Наборы данных и методы исследования ▶

Использованные наборы данных представлены в таблице. Методика, применявшаяся для получения уравнения пороговой для возникновения оползней корреляции между интенсивностью и длительностью дождей на исследуемой территории, схематично показана на рисунке 1.

### Обработка данных для определения пороговой для схода оползней корреляции между интенсивностью и длительностью дождей ▶

Для определения порога возникновения оползней по атмосферным осадкам использовались данные по максимальной интенсивности дождей (мм/ч) за 3-часовые и суточные интервалы по снимкам со спутника TRMM 3B42 V.7 с 1 июня 2013 года по 1 октября 2014 года. Эти данные загружались в формате NetCDF, а затем преобразовывались в формат TIFF для дальнейшей обработки.

Затем для 3-часовых файлов находили максимальные значения интенсивности дождей. После этого объединяли по восемь 3-часовых файлов в один суточный файл для каждой даты. Из каждого такого объединенного файла снова выбиралась максимальная интенсивность осадков (соответствующая конкретному часу) – теперь уже за сутки.

Продолжительность дождей определяли на основе файлов за месяц, полученных путем объединения суточных файлов, – по количеству суток, переведенных в часы, когда дождь шел непрерывно вплоть до даты возникновения оползня.

Данные по сходам оползней в 2013 и 2014 годах, были предоставлены Организацией приграничных дорог (Border Road Organization, BRO) – инженерным корпусом индийской армии, который разрабатывает и поддерживает дорожные сети в приграничных районах Индии и дружественных ей соседних странах.

Для построения графика корреляционной связи между максимальной интенсивностью дождевых осадков в день оползневого события  $I$  (мм/ч) и продолжительностью непрерывного дождя вплоть до этого дня  $D$  (ч) была подготовлена соответствующая база данных для 61 отдельного оползня. По построенному графику было получено уравнение корреляционной связи « $I - D$ », пороговой для возникновения оползней.

Проверка достоверности этого уравнения проводилась с использованием данных по  $I$  и  $D$  с использованием информации по оползням в период муссонных дождей с 1 августа по 1 октября 2014 года. Были проанализированы данные для семи основных участков вдоль трассы NH-58, таких как Карнапраяг, Нандпраяг, Чамоли, Пипалкоти, Тангини, Джошимат и Ламбагарх.

### Обработка данных по инвентаризации оползней ▶

Для выявления и картирования оползней основное внимание уделялось оптическим изображениям с высоким разрешением. Была составлена карта идентифицированных оползней на основе мультиспектральных изображений с разрешением 30 м, полученных 22.05.2013 и 20.11.2015 со спутника Landsat 8 OLI. Результаты этой работы были дополнительно подтверждены с помощью временных рядов изображений, полученных на сервисе Google Earth. Поскольку исследуемая территория не такая уж большая, для быстрого получения результатов использовался метод визуальной интерпретации.

### Результаты и их обсуждение ▶

Полученный график корреляционной связи между максимальной интенсивностью дождевых осадков в день возникновения оползня  $I$  (мм/ч) и продолжительностью непрерывного дождя вплоть до дня оползневого события  $D$  (ч) в логарифмическом масштабе представлен на рисунке 2. По его нижней ограничивающей линии была установлена следующая связь:

$$I = 4,738D^{-0,0253} \quad (1)$$

Это уравнение может быть использовано для определения вероятной продол-

Таблица. Наборы данных, использованных для исследования

Что использовалось при исследовании	Источник или название	
Данные	по дождевым осадкам	3-часовые снимки со спутника TRMM с разрешением 0,25°×0,25°
	по интенсивности дождей	Ежедневные снимки со спутника TRMM с разрешением 0,25°×0,25°
	оптические	Снимки со спутника Resourcesat 2 LISS-IV с разрешением 5,8 м (2014 г.) и со спутника Landsat 8 OLI с разрешением 30 м (2013 г. и 2015 г.)
	вспомогательные	Данные инженерного корпуса индийской армии BRO и вспомогательные данные инвентаризации оползней (2013–2014 гг.)
Программное обеспечение	Arc GIS 10.3; Quantum GIS; Erdas Imagine 2014; R Software	

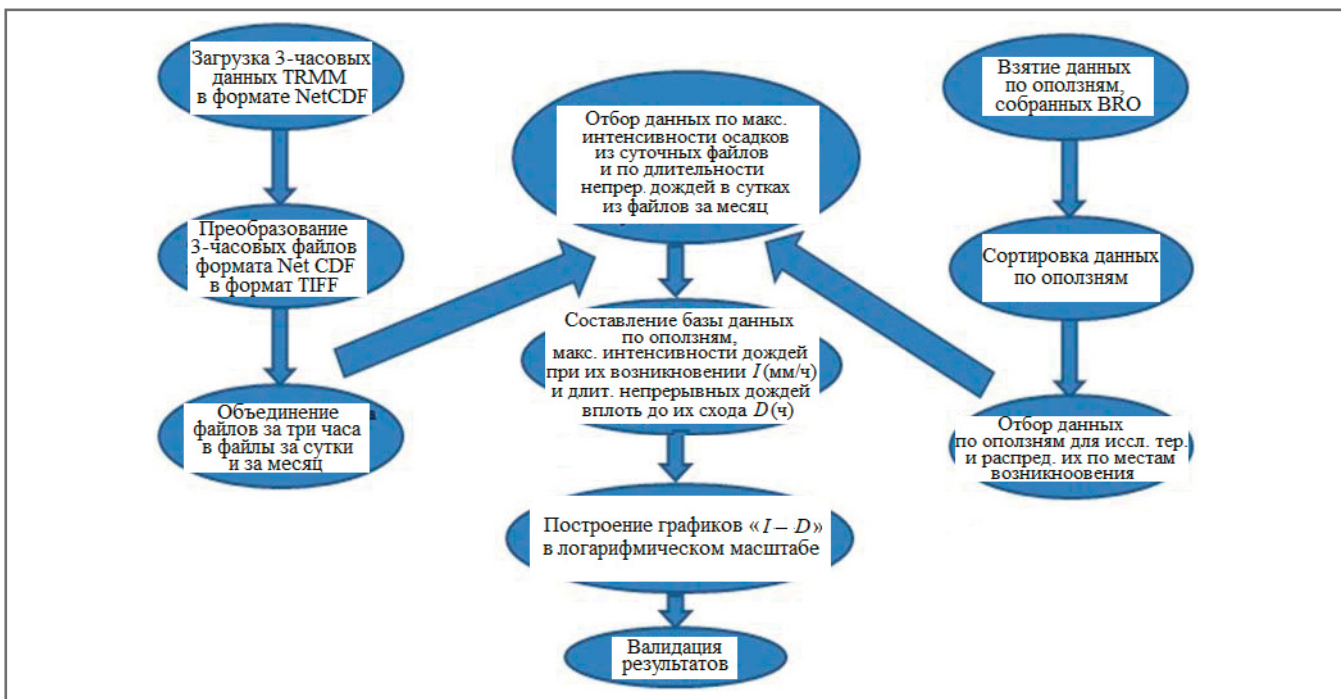


Рис. 1. Блок-схема методики определения пороговой для возникновения оползней корреляционной связи между интенсивностью и длительностью дождевых осадков

жительности дождевых осадков, которая может привести к разрушению склона.

Для получения уравнения (1) использовали данные для 61 оползня за период с 2013 по июль 2014 года. Дождевые осадки, вызывающие эти оползни, характеризовались большим разбросом с точки зрения продолжительности и максимальной интенсивности. Самое высокое наблюдавшееся значение интенсивности составило 12,84 мм/ч, а самое низкое – 0,62 мм/ч. Наибольшая продолжительность непрерывного дождя, равная 360 ч, наблюдалась при интенсивности 0,79 мм/ч, а наименьшая, равная 72 ч, – при интенсивности 11,96 мм/ч. Это наводит на мысль о том, что высокая интенсивность дождя приводит к разрушению склона уже при кратковременных осадках, а низкая – при длительных.

Также были построены логарифмические графики для определения пороговой корреляционной связи «I – D»

для каждой отдельной станции наблюдений на исследуемой территории.

Достоверность порогового уравнения (1) была проверена с использованием данных по оползням, случившимся в период муссонных дождей с 1 августа по 1 октября 2014 года, для станций Нандпраяг, Чамоли, Пипалкотти, Тангини, Джошимат и Ламбагарх. Точность прогнозов, полученных по этому уравнению, составила 70%.

Выполненные исследования также дали возможность установить для вышеуказанных станций пороговую корреляционную связь между максимальной интенсивностью дождя на исследуемой территории в день схода оползня и средним уклоном поверхности грунта при постоянной продолжительности (80 ч) непрерывного выпадения осадков до дня оползневого события. Эта связь оказалась отрицательной (обратно пропорциональной) и имела коэффициент

детерминации  $R^2$ , равный 0,59. Линия ее тренда описывается следующим уравнением:

$$y = -1,237x + 42,100, \quad (2)$$

где  $y$  – средний уклон поверхности;  $x$  – максимальная интенсивность дождя.

Уравнение (2) показывает, что при постоянной продолжительности дождевых осадков их количество, необходимое для возникновения оползней, увеличивается с уменьшением уклона поверхности.

Также была проведена инвентаризация оползней для отслеживания их сходов на исследуемой территории в течение определенного периода времени (рис. 3, 4). В качестве базового для отражения изменений в частоте оползневых событий был выбран 2013 год. Распространенными типами оползней в данном районе являются оползни раз-

жижения (например, сели), оползни скольжения скальных пород, оползни скольжения дисперсных грунтов. И очень немногие оползни являются вращательными. Большинство оползней было выявлено рядом с крутыми склонами. Из карты инвентаризации оползней видно, что большинство из них произошло на восточном берегу реки, что совпадает с расположением дороги и населенных пунктов.

### Выводы и рекомендации ►

Эмпирически была установлена пороговая для инициирования оползня корреляционная связь между максимальной интенсивностью дождевых осадков в день оползневого события  $I$  (мм/ч) и продолжительностью непрерывного дождя до этого дня  $D$  (ч), которая описывается уравнением (1). В качестве источника данных по интенсивности дождевых осадков использовались снимки со спутника TRMM 3B42 V.7.

При проверке достоверности уравнения (1) точность прогнозов возникновения оползней, полученных с его помощью, составила 70%. Также было замечено, что оползни случают-

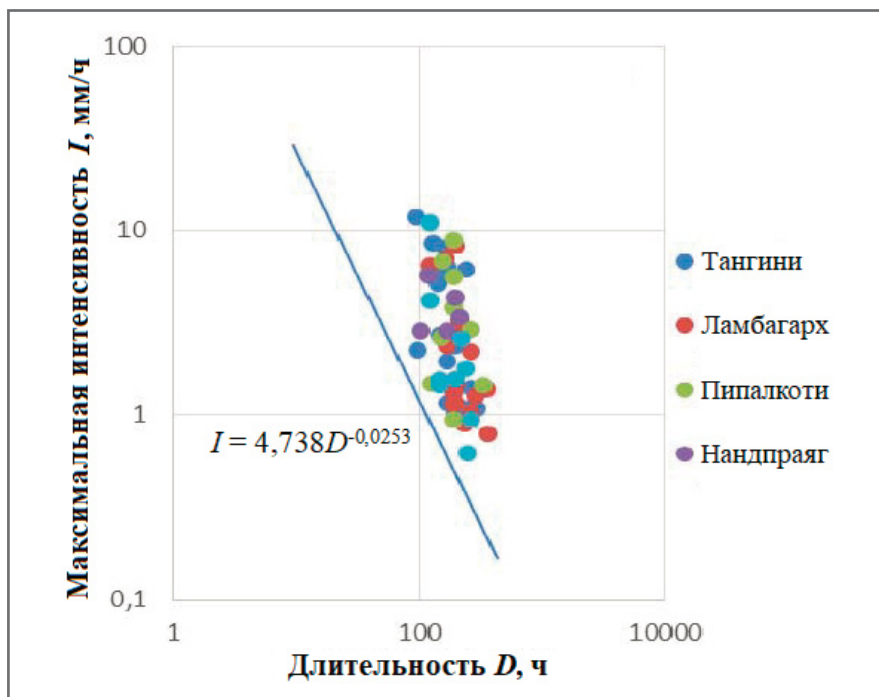


Рис. 2. График корреляционной связи между максимальной интенсивностью дождевых осадков в день возникновения оползня  $I$  (мм/ч) и продолжительностью непрерывного дождя вплоть до дня оползневого события  $D$  (ч) в логарифмическом масштабе

ся при интенсивности дождя более 3,7 мм/ч при его постоянной продолжительности.

Уравнение (1) должно быть базовым элементом системы оповещения об оползневой опасности в режиме реаль-

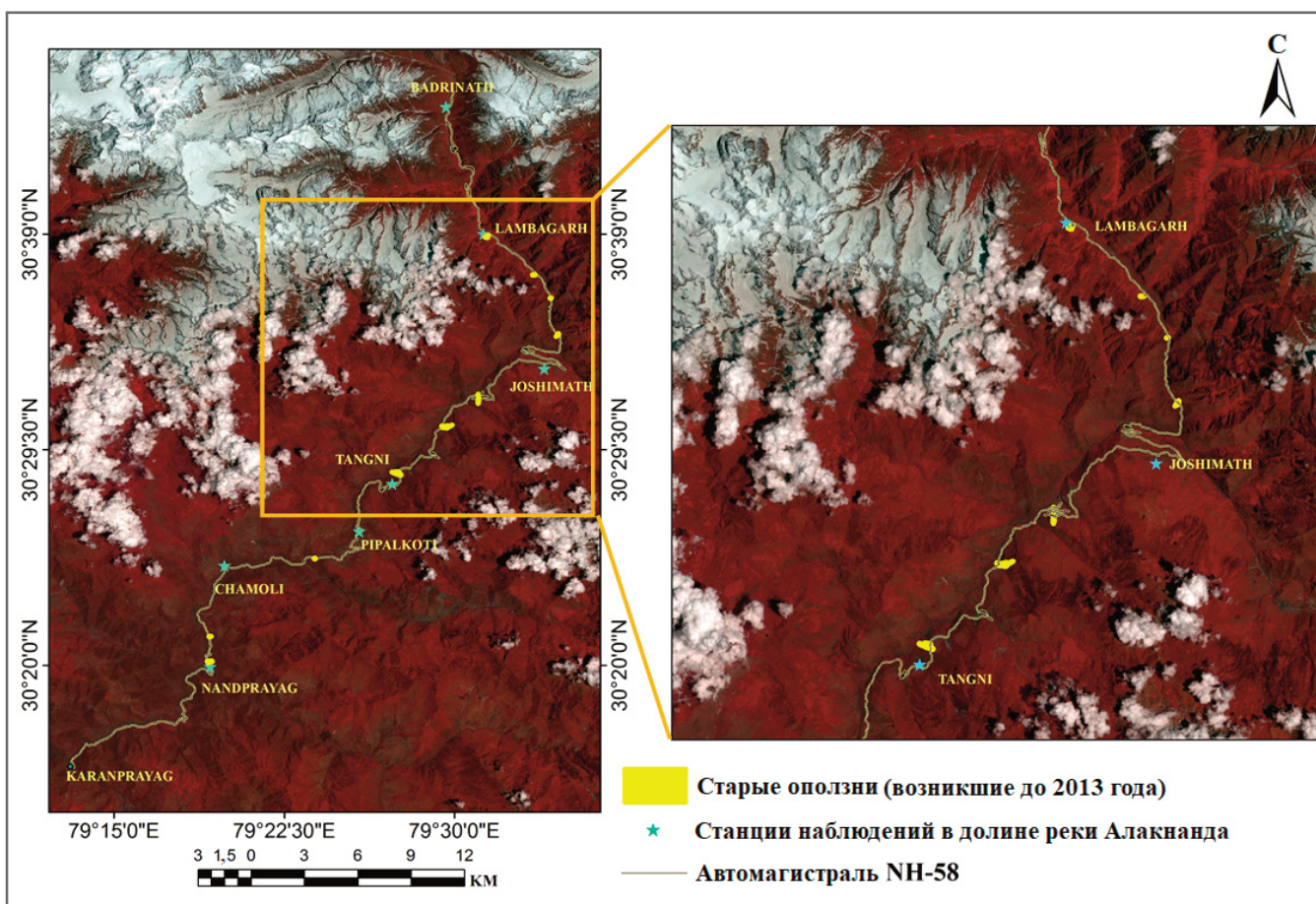
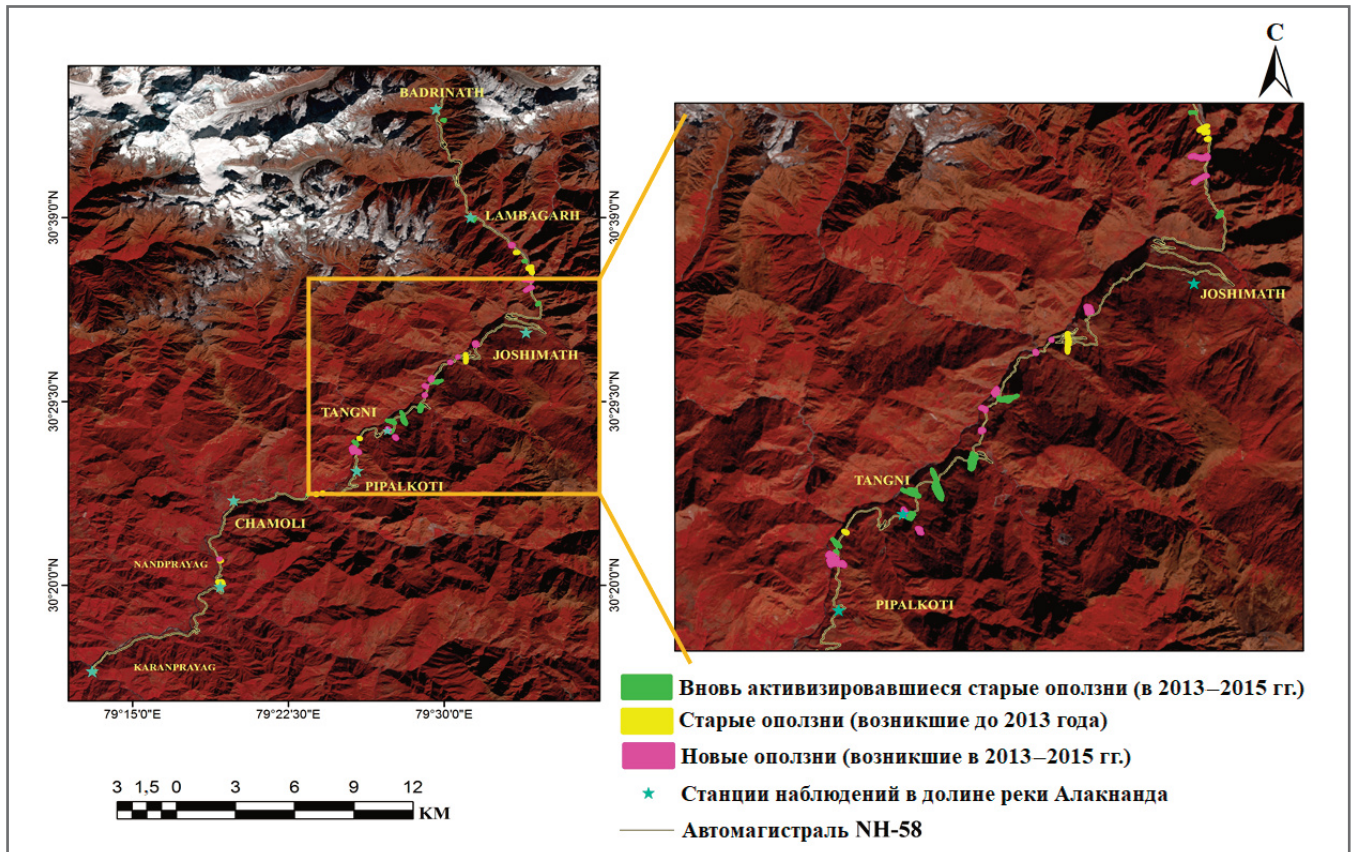


Рис. 3. Карта инвентаризации оползней по данным 2013 года, составленная на основе снимков с американского спутника Landsat 8, изображений с сервиса Google Earth и данных инженерного корпуса индийской армии BRO. Эта карта показывает выявленные оползни, произошедшие до 2013 года.



**Рис. 4.** Карта инвентаризации оползней по данным 2013 и 2015 годов, составленная на основе снимков с американского спутника Landsat 8, изображений с сервиса Google Earth и данных инженерного корпуса индийской армии BRO. Эта карта показывает выявленные оползни за период 2013–2015 гг.

ного времени. На его получении, по существу, и было сосредоточено представленное исследование. Эта работа была выполнена потому, что дождевые осадки являются основным провоцирующим фактором для возникновения оползней в долине реки Алакнанда, поскольку дожди приводят к увеличению порового давления воды, уменьшению удельного сцепления грунтов и инфильтрации воды в слабые зоны, а эти факторы являются основными для разрушения склонов.

При этом очень большое влияние на инициирование оползней оказывает крутизна склона. Пороговая корреляционная связь между средним уклоном поверхности и максимальной интенсивностью дождя в день оползневого события при постоянной продолжительности выпадения осадков (80 ч) для исследуемой территории описывается уравнением (2) с коэффициентом детерминации  $R^2$ , равным 0,59. Это уравнение яс-

но показывает отрицательную (обратно пропорциональную) связь между максимальной интенсивностью дождевых осадков и уклоном поверхности.

Полезность полученного порогового уравнения (1) заключается в том, что в любой момент, используя преобладающее значение интенсивности дождя, можно определить его вероятную продолжительность, в течение которой порог для возникновения оползней будет превышен. Поэтому уравнение (1) можно использовать для раннего предупреждения в районах, которые подвержены разрушению склонов.

Кроме того, представленное исследование показало, что для рассматриваемой территории необходимы постоянный мониторинг дождевых осадков и система раннего предупреждения, поскольку этот район населен и к тому же является одним из важных центров паломнического туризма в Индии.

Полученные результаты можно значительно улучшить с помощью наземных оценок по дождевым осадкам и усовершенствованной базы данных по оползням. Дальнейшие исследования пороговой для оползневых событий корреляционной связи « $I - D$ » предлагается основывать на новейшем наборе данных, полученных Миссией GPM (Global Precipitation Measurement – «Глобальное измерение осадков»), включающей ряд спутников США и Японии, которые используются для глобального изучения осадков, испарения и круговорота воды. Также следует попытаться найти пороговую для инициирования оползней корреляционную связь между уклоном поверхности и продолжительностью дождя при его постоянной интенсивности. Все это поможет получить гораздо более качественную информацию для разработки системы раннего предупреждения об опасности возникновения оползней. ▮

**Источник для перевода** ▶

**(Source for the translation)** ▶

Bhattacharjee S., Ray P.K.Ch., Chattoraj Sh.L., Dhara M. Precipitation intensity: duration based threshold analysis for initiation of landslides in Upper Alaknanda Valley // International Journal of Geological and Environmental Engineering. WASET (World Academy of Science, Engineering and Technology), 2017. Vol. 11. № 2.

**Список литературы, использованной автором переведенной статьи** ▶**(References used by the author of the translated article)** ▶

1. Highland L. Landslide Types and Processes. 2004. The last accessed date: 15 May 2016. URL: [pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf](https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf).
2. Walker L.R., Shiels A.B. Physical causes and consequences // *Landslide Ecology*. New York: Cambridge University Press, 2013. P. 46–82.
3. Caine N. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows // *Geografiska Annaler*. 1980. Vol. 62. № 1/2. P. 23–27.
4. Campbell R. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California: U.S. Geological Survey Professional Paper. 1975.
5. Starkel L. The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain // *Geographica Polonica*. 1979. Vol. 41. P. 13–20.
6. Wiczorek G.F., Guzzetti F. A review of rainfall thresholds for triggering landslides // *Proceedings of the EGS Plinius Conference, Maratea, Italy, October 1999*. Italy, Cosenza, 2000.
7. Brand E. Slope instability in tropical areas // *Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, 1995*.
8. Hansen A., Franks C., Kirk P., Brimicombe A., Tung F. Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong: in Carrara, Alberto, and Guzzetti // *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 273–298.
9. Johnson K., Sitar N. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation // *Canadian Geotechnical Journal*. 1990. Vol. 27. P. 789–801.
10. Iverson R., Reid M., LaHusen R. Debris-flow mobilization from landslides // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997. Vol. 25. P. 85–138.
11. Patwary M., Champati ray P., Parvaiz I. IRS-LISS-III and PAN data analysis for landslide susceptibility mapping using heuristic approach in active tectonic region of Himalaya // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2009. Vol. 37. № 3. P. 493–509.
12. Montgomery D., Dietrich W., Torres R., Anderson S., Heffner J., Loague K. Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall // *Water Resources Research*. 1997. Vol. 33. № 1. P. 91–109.
13. Devi S., Goswami D.C. The subansiri river basin in eastern Himalayas and the Alaknanda river basin in western Himalayas: a comparative study in regard to their geo-environment and hydrometeorology // *International Journal of Environmental Sciences*. 2014. Vol. 5. № 1. P. 135–143.
14. Lakhera S. Precipitation Intensity – Duration Based Threshold Modelling and landslide impact assessment in Alaknanda Valley. Dehradun: M. Tech Thesis, IIRS, 2015.



## Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>