ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПОЛЗНЕЙ ПО ДАННЫМ АЭРОФОТО- И СПУТНИКОВЫХ СЪЁМОК

К.М. Ляписhev
Кубанский государственный университет
г. Краснодар, Россия, k.m.lyapishev@gmail.com

OVERVIEW OF MODERN RESEARCH OF LANDSLIDES ACCORDING TO AERIAL AND SATELLITE IMAGERY

K.M. Lyapishev
Kuban State University
Krasnodar, Russia, k.m.lyapishev@gmail.com

Abstract. This article is an overview of researches of landslides using remote sensing methods such as aerial photography, satellite images, radar interferometry, and their combination with the use of GIS technology. Modern methods of investigation of landslides are very diverse. The authors propose different approaches to the identification, classification and monitoring of landslides. Data analysis techniques can help in creating more sophisticated approach to the analysis of landslides.

Keywords: satellite image, landslides, remote sensing.

Введение. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в исследованиях оползней активно используются с 90-х гг. XX в. Технологические достижения в индустрии ДЗЗ двух последних десятилетий способствуют широкому внедрению космических и аэрофотоснимков в разнообразные научные и многочисленные прикладные области. Современное поколение сенсоров для космической съёмки с коммерческих спутников обеспечило новый уровень исследовательских возможностей, вызванный появлением, прежде всего, снимков сверхвысокого пространственного разрешения (менее 1 м для черно-белых и 2,5 м для многоспектральных).

Данные ДЗЗ применяются как для идентификации и картографирования оползней, так и для мониторинга и анализа динамики оползневых объектов и процессов. Для указанных целей привлекают съёмки в видимой, ближней инфракрасной, тепловой инфракрасной, радиоволновой и ультрафиолетовой зонах спектра. В последнее время исследования оползней средствами космической съёмки расширились за счет съёмок в радиодиапазоне, поскольку радарная интерферометрия позволяет обнаруживать деформации и смещения земной поверхности в доли см [21].

Результаты недавнего опроса европейских ученых об использовании данных дистанционного зондирования в исследованиях оползней [19] показали, что при идентификации оползней основными источниками данных являются аэрофотоснимки, часто объединенные с данными спутниковых снимков в видимом (оптическом) или радиодиапазонах. При мониторинге оползней, предполагающем оценку их динамического состояния, основным источником сведений являются космические снимки.

В совокупности методов картографирования оползней следует выделить:

1. традиционные методы (полевое геоморфологическое картографирование, визуальное дешифрирование аэрофотоснимков);
2. современные методы (визуальная интерпретация оптических изображений, анализ мультиспектральных изображений, использование данных SAR – радаров с синтезированной апертурой);
3. методы улучшенного полевого картографирования (с использованием GPS для съёмки и ГИС-технологий) [6].

Решаемая задача. В настоящем обзоре обобщён опыт многочисленных зарубежных исследований оползней средствами аэрофото- и космической съёмки с опорой на публикации, отражающие актуальную методику и некоторые характерные результаты исследований. В России, несмотря на то, что мониторингу катастрофических экзогенных процессов уделяется немалое внимание, такого рода исследования в настоящее время носят фрагментарный характер и находятся в стадии становления. Описание дано по ключевым направлениям проблематики:

1. аэрофотосъёмка;
2. спутниковые съёмки и методы дешифрирования оползней;
3. радарные съёмки;
4. методика обработки спутниковых материалов;
5. анализ оползневых процессов (кинематика).

Материалы исследования.

Аэрофотосъёмка. Материалы аэрофотосъёмки, имеющие достаточное пространственное разрешение, весьма часто служат источником полезных сведений об оползнях. Так, временные серии аэрофотоснимков использованы для определения смещения оползня Тессина в Италии [14]. «Разности» двух обработанных снимков позволяют определить пороговое значение, применяемое в свою очередь для бинарной

классификации изображения по признаку изменившихся и неизменившихся участков. Для этой цели подходят различные методы обработки изображений (нормального распределения, наименьших квадратов медиан, метод Пуассона, метод связности, угловой метод) и подходы (статистический, энтропийный и др.). Полученные карты нуждаются в фильтрации для отражения «истинных» изменений, для чего полезны картометрические характеристики – площадь, ширина, периметр, «прямоугольность». В частности, эти фильтры позволяют выявить антропогенные объекты. В итоге полученная карта отражает территорию с «истинными» естественными изменениями.

Еще одна статья с участием упомянутых авторов [7] посвящена мониторингу оползня Тессина. При подготовке изображений использована орторектификация по данным ЦМР, и радиометрическая нормализация для удаления различий в освещенности, физических условиях атмосферы и откликов сенсора. Определение изменений заключается в сравнении значений соответствующих пикселей двух изображений за разные даты. Для отделения «истинных» изменений от шумов вводится порог, выше которого изменения считаются истинными. При этом реализуется алгоритм, разработанный Росином [15]. Выявляют положительные (рост яркости пикселя от старого к новому изображению) и отрицательные (падение яркости) изменения поверхности, отфильтровывают прямоугольные блоки изображения (кластеры расположенных рядом пикселей). На следующем этапе происходит выделение появившихся почвенных обнажений с положительными изменениями яркости и участков с отрицательными изменениями яркости (растительность). В результате авторы представляют карту с участками положительного изменения яркости пикселей (зоны активизации оползня), и отрицательного изменения яркости пикселей (рост растительности или увеличение влажности почвы). Следующий шаг – удаление артефактов в виде участков землепользования, сооружений, дорог и т.п.

Предложенный метод автоматического определения изменений цифровых разновременных снимков высокого разрешения успешно апробирован и, по мнению [7], может применяться для мониторинга оползней на большой территории. Благодаря использованию современных космических снимков и GPS-техники существует возможность улучшения предлагаемого метода.

Космические снимки. Некоторые процедуры предварительной обработки снимков описаны в статье [10]. Источником данных для исследования оползней прибрежной территории штата Сан-Паулу (Бразилия) послужили космические снимки спутников Landsat-7 и SPOT-4. Обработка снимков включала нормализацию, трансформацию и некоторые другие процедуры. Трансформация выполнена различными методами, однако лучший результат показал метод IHS (IntensityHueSaturation). Проведена классификация снимков, при этом оценка точности классификации (значение Каппа) составила 95,42%.

Результаты эффективного исследования оползневых процессов с использованием космических снимков представлены в публикации [5]. В методической части публикации описан способ автоматического определения оползней по панхроматическим и мультиспектральным снимкам Ikonos, Spot-5 и Landsat-7 в районе Кордильера-Бетика (Испания). Снимки были геометрически откорректированы и приведены к проекции UTM; для удаления атмосферных эффектов проведена радиометрическая коррекция Чавеса. После предобработки снимки улучшены линейным растяжением гистограмм. Из полученных изображений созданы различные цветные композиции. Объединение мультиспектральных и панхроматических снимков способствовало улучшению пространственного разрешения.

Для дешифрирования оползней авторами [5] применены различные фильтры. Так, для нахождения линейных элементов оползней (обрывы, гребни и др.) использовались фильтры улучшения границ в скользящем окне 3×3 (оператор Лапласа и Собеля). Кроме того, применены текстурные фильтры на основе расчетов дисперсии, среднего евклидова расстояния и GLCM (GrayLevelCooccurrenceMatrices) с целью оценки изменчивости одного пикселя относительно соседей. Для идентификации оползней рассчитан индекс NDVI, а для трансформации использован метод главных компонент, благодаря чему оползни лучше определялись. По мультиспектральным снимкам выполнена контролируемая классификация. На заключительном этапе сделан статистический ГИС-анализ, включавший расчет показателей зональной статистики и коэффициентов корреляции (Колмогорова-Смирнова), с помощью которых определялась полезность изображения для различения оползней и стабильных участков поверхности.

В комбинации с космическими снимками для получения лучших результатов целесообразно применение дополнительных источников данных. Например, в статье [1] при определении стенок отрыва оползней в Каскадных горах в Британской Колумбии (Канада) выполнялась сегментация космических снимков в сочетании с использованием ЦМР территории. По показателям NDVI (пороговое значение 0,69) территория классифицировалась на залесенную и незалесенную, далее по данным ЦМР – на плоскую и условно горную (пороговое значение крутизны склонов 15^0). На заключительном этапе применительно к незалесенным горным территориям выполнялась контролируемая классификация с выделением классов поверхности «снег», «скالы», «осыпи», «тени», «вырубки» и «оползни».

При оценке точности разработанной методики авторы опирались на выборку из 40 оползней, идентифицированных по данным аэрофотосъемки. Точность метода оценена в 75%. При этом половина ошибок вызвана выделением оползней как залесенных участков. Некоторые из этих ошибок можно объяснить пятилетним расхождением между датами аэрофотосъемки и спутниковой съемки. Другие ошибки связаны с внесением оползней в классы скал и осыпей. Авторы заключают, что данная методика будет полезной при ин-

вентаризации оползней больших размеров, т.к. спектральная классификация обычно обеспечивает не более 50% точности.

Аналогичный подход к идентификации оползней продемонстрирован в работе [3]. Статья посвящена обнаружению оползней с помощью мультиспектральных космических снимков на экспериментальной лесной территории площадью 333 км² Национального университета Тайваня. Процедура геореференсинга изображений осуществлялась методом PTM (PolynomialTrendMapping); оценки ошибок регистрации рассчитаны посредством ординарного кригинга (ordinarykriging). Спектральное нормирование (spectralratoning) хорошо компенсирует разницу в яркости, вызванную различными атмосферными условиями. Обработка снимков включала выравнивание спектральных пиков гистограмм. При этом отношения каналов IR/R до и после события имели стабильные значения уровня серого для большинства типов землепользования и расчленимого покрова. Тем не менее, частоты отдельных уровней серого различны на разных изображениях. Изменение частоты отражает число пикселей, соответствующих изменениям поверхности, что дает возможность оценить процент изменившихся участков на разных снимках. При разделении на изменившиеся и неизменившиеся участки установлен предел, выше которого разница в уровне серого расценивается как изменение. Поскольку не все выявленные путем определения изменений участки являются оползнями, авторы использовали показатели крутизны склонов по данным ЦМР. Эмпирически на основании предыдущих исследований оползней в регионе установлен порог крутизны склона в 22°.

Зачастую данные ДЗЗ служат источником для последующего моделирования оползневых процессов. Так, в статье [11] для оценки количественного вклада различных факторов в формирование возможных оползней авторы прибегли к статистическому моделированию (FrequencyRatioModel). Местоположение оползней определено по данным аэрофотосъемки, картам оползней и полевым съемкам. Всего выделено 10 факторов. Угол наклона склона, экспозиция склона, высота, расстояние от дороги, плотность водотоков получены из топографической базы данных. Сведения о литологии, стратиграфии и других характеристиках отложений получены из геологической базы данных. Плотность линеаментов рассчитана по данным космоснимка Landsat-7, а почвенная карта заимствована из почвенной базы данных. Модель относительных частот представляет собой разбиение каждого фактора на несколько классов. По каждому классу вычисляют пять показателей:

1. количество пикселей, занимаемых этим классом;
2. процент от общего количества пикселей;
3. количество пикселей оползней;
4. процент от общего количества пикселей оползней;
5. отношение между пунктами 4 и 2, называемое частотой.

Авторы статистически оценили отношения между оползнями и дестабилизирующими факторами. Установлено, что расстояние от дороги, плотность линеаментов и угол наклона склона – самые важные факторы, влияющие на оползневой процесс. Значения относительной частоты использованы для создания «индекса подверженности оползням» (LandslideSusceptibilityIndex – LSI), в соответствии с которым исследуемая территория была разделена на 5 зон по предрасположенности к оползням. Результаты анализа проверены путем расчета доли ложных положительных классификаций. Точность составила 88,3%. Несомненным достоинством работы служит карта LandslideSusceptibilityIndex. Авторы заключают, что созданная карта может быть использована для правильного планирования землепользования.

В последние годы особое значение в исследовании оползней имеют работы, ориентированные на данные радарной интерферометрии. Например, японские ученые [8] использовали три интерферограммы для анализа оползня Итайя на северном склоне вулкана Азумама. Метод 3-х проходов позволяет охарактеризовать пространство сдвига, а метод DEME (digital elevation model elimination) отражает различия в механическом поведении сдвигов. Эти данные позволили создать модель движения подчиненных блоков вдоль поверхности скольжения в период сильных осадков. Данные интерферометров отражают «поведение» оползня, что выгодно отличает их от дискретных методов измерений (измерения с использованием GPS).

Землетрясения способны вызвать многочисленные оползни, которые иногда причиняют больший ущерб, чем непосредственно землетрясения. Оползни, вызванные землетрясениями, исследуют с помощью космических снимков. В статье [16] по данным нескольких землетрясений (Чамоли, Кашмир, Сычуань) анализируются спутниковые снимки территории до и после землетрясения. Выделено несколько характерных пространственных признаков обнаруженных оползней:

1. землетрясения в основном активизируют оползни на южном (освещенном) склоне;
2. оползни сконцентрированы вблизи горных хребтов;
3. расположение оползней в таких областях ведёт к увеличению сдвига во время землетрясения-горных пород на крутых склонах.

Китайскими исследователями [20] предложен метод оперативного картографирования оползней, вызванных недавними землетрясениями. Для этой цели применяются снимки ASTER и Landsat. Определение изменений выполнено посредством расчета NDVI по снимку Landsat до землетрясения и NDVI по снимку ASTER после землетрясения. Участки с уменьшением значений индекса NDVI более чем на 10% (пороговая величина для яркости пикселя) интерпретируются как оползневые. Итог работы – карта распределения оползней, вызванных Сычуаньским землетрясением 2008 г. Большая часть оползней оказалась сосредоточена в долине реки Мингджинг и ее основных притоках.

Космические снимки высокого разрешения могут быть основой для получения различных количественных показателей, необходимых для оценки оползневой опасности. Такой опыт нашел отражение в статье [2], в которой использованы снимки спутника Quickbird (2002 и 2005 гг.) территории Калифорнии (США). Между датами съемок произошли события (пожар и шторм), повлиявшие на оползневую активность. Авторы выполнили ортотрансформирование по данным ЦМР; применили неконтролируемую классификацию, определив необходимые показатели: глубину почвы, сцепление и угол внутреннего трения, сцепление корней, мощность почвенного слоя, вес растительности и др. Установленные показатели представлены в эмпирической формуле для расчета фактора устойчивости склона.

Применение ГИС-технологий в сочетании с данными ДЗЗ усиливает возможности анализа оползневых процессов. Так, в статье [9] ГИС-технологии и ДДЗЗ реализованы для оценки объема оползней, вызванных тайфунами в водосборе водохранилища Шихмень на Тайване. Использовались спектральные спутниковые снимки за период с 1996 по 2008 гг., а также сведения об атмосферных осадках. Авторы выполнили регрессионный анализ с получением эмпирической формулы для оценки объемов оползней для двух водосборных бассейнов. При расчете объема учтены крутизна поверхности и глубина оползания. Верификация формулы выполнена по материалам событий двух тайфунов. Построена карта распределения атмосферных осадков и прироста оползневых территорий, приведены сравнительные данные предсказанных и реальных значений объемов оползней.

В статье [13] по данным района Сумеданг (Индонезия) с использованием статистических методов и средств ГИС разработана классификация оползневой опасности территории. В качестве факторов опасности выступают 4 показателя: крутизна склона, количество осадков, литология и тип землепользования. Каждый показатель в свою очередь имеет 5 градаций, вес которого оценивается статистически. В результате исследуемая территория на полученной карте классифицирована в соответствии с 4 степенями оползневой опасности.

Характерным обобщением опыта использования ГИС-технологий для оценки оползневой опасности служит работа [17]. Авторы, указывая на значимость ГИС в моделировании, приводят классификацию методов оценки оползневой опасности, разделяя их на качественные (эвристические) и количественные. Эвристические методы в свою очередь делятся на не прямые и прямые, а количественные методы – на вероятностные, статистические и физические. Авторы дают описание приведенных методов со ссылкой на соответствующие публикации. В заключении в сравнительном аспекте описаны технологии получения пространственной информации (аэрофотосъемка, спутниковая съемка, лидарная съемка, SAR, использование GPS) и их преимущества при выполнении измерений и информационном обеспечении баз пространственных данных.

Среди особых подходов следует упомянуть построение нейронных сетей для картографирования территорий, подверженным оползням [12]. Обучения сети произведено на 5 тестовых площадках по данным аэрофотосъемки территории штата Селангор в Малайзии. Дополнительные 4 площадки использованы для верификации результатов. Точность модели определена в 82–87%. Автор выделил 9 факторов, влияющих на оползневой процесс. Разработанная методика применена для картографирования оползней в Малайзии.

Эксклюзивным методом при оценке оползневой опасности следует признать нечеткие множества. Авторы из Ирана [18] использовали данные космических снимков LandsatETM+, SPOT, IRS-ID наряду с набором количественных факторов (уклон и экспозиция склонов, литология, характер землепользования, расстояние до водотока, расстояние до дороги, расстояние до стенки отрыва / смещения, атмосферные осадки). В результате на базе теории нечетких множеств создана модель с высокой точностью расчетов. Указывается на гибкость метода, включающего экспертное мнение.

Нельзя недооценивать изучение кинематики оползней для оценки их опасности и прогнозирования. Опыт показывает, что и для этих целей весьма полезны данные ДЗЗ. Так, статья [4] представляет обзор различных техник анализа кинематики оползней. Авторы описывают интерферометрию с её преимуществами и недостатками. Отмечается, в частности, что дифференциальная интерферометрия (DInSAR) не приспособлена для горных регионов. Среди ограничений применимости выделяют геометрическую дисторсию, а также неточности из-за сложной поверхности, ведущие к декорреляции; кроме того упоминается влияние на качество измерений состояния атмосферы. Описаны различные платформы и сенсоры для сбора информации (аэрофотоснимки, оптические космоснимки, платформы дистанционного управления, установленные на беспилотных летательных аппаратах). Приведены примеры практического использования различных методов и их комбинаций для научных исследований. По мнению [4] аэрофотосъемка оптимальна для исследований «быстрых оползней» (25 см/г. и более); спутниковые снимки высокого пространственного разрешения можно применять как для научных целей, так и для предупреждения оползневой опасности. Интерферометрию целесообразно применять в научных целях при измерении «очень быстрых оползней» (1–4 см/день). Данные наземного лазерного сканирования НЛС могут быть использованы для научных исследований и предупреждения оползневой опасности. Недостаток НЛС – малое покрытие съемки.

Выводы. Итак, судя по выполненному обзору характерных тематических публикаций, ДДЗЗ представляют собой эффективный инструмент мониторинга и картографирования оползней, а также высокотехнологичного анализа оползневой опасности. Материалы дистанционного зондирования (аэрофотосъемка, космическая съемка, радарная интерферометрия и др.) достаточно широко используются в разнообразных исследованиях оползневых процессов, причем не только в виде самостоятельных методов, но и в сочетании

ях. Часто ДДЗЗ служат основным источником исходных данных, а применение передовых методов обработки (статистическое моделирование, нейронные сети, нечеткие множества) и ГИС-технологий способствуют достижению качественных результатов. В обозримой перспективе значимость материалов ДЗЗ в исследовании оползневых явлений несомненно будет усиливаться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Barlow J., Martin Y., Franklin S. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2003. 29(4). P. 510–517.
2. Blesius L., Weirich F. The use of high-resolution satellite imagery for deriving geotechnical parameters applied to landslide susceptibility. // In: Heipke, C., K. Jacobsen, S. Müller, and U. Sörgel (eds.): *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVIII-1-4-7/W5 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Hannover Workshop 2009 on High-resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Hannover, Germany. 5–9 June 2009. 6 p.
3. Cheng K., Wei C. & Chang S. Locating landslides using multi-temporal satellite images // *Advances in Space Research*. 2004. 33. P. 296–301.
4. Delacourt C., Allemand P., Bertheir E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P. Pambrun C., Varel E. Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review // *Bull. Soc. Geol. FR*. 2007. 178(2). P. 89–100. doi:10.2113/gssgfbull.178.2.89.
5. Fernández T. Jimenez J., Fernandez P., El Hamdouni R., Cardenal F.J., Delgado J., Irigaray C., Chacon J. Automatic Detection of Landslide Features with Remote Sensing Techniques in the betic Cordilleras (Granada, Southern Spain) // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B8. P. 351–356.
6. Guzzetti F., Mondini A.C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.T. () – Landslide inventory maps: New tools for an old problem // *Earth-Science Reviews*. 2012. 112. P. 42–66. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.
7. Hervas J., Barredo J.I., Rosin P.L., Pasuto A., Mantovani F., Silvano S. Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy // *Geomorphology*. 2003. Vol. 54. P. 63–75.
8. Kimura H., Yamaguchi Y. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry // *Photogrammetric engineering & remote sensing*. March 2000. Vol. 66. №3. P. 337–344.
9. Lin B.S., Leung W.Y., Chi S.Y., Lo W.C. Applying GIS and Remote Sensing to Simply Estimate Landslide Volume of Typhoon Events in a Watershed // *2011 International Conference on Fuzzy Systems and Neural Computing*. 2011. P. 136–139.
10. Marcelino E., Formaggio A., Maeda E. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil // *International Journal of applied Earth observation and geoinformation*. 2009. 11. P. 181–191.
11. Mezughi T.H., Akhir J.M., Rafek A.G., Abdullah I. Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli) // *American Journal of Environmental Sciences*. 2011. 7 (1). P. 43–50.
12. Pradhan B. An Assessment of the use of an advanced neural network model with five different training strategies for the preparation of landslide susceptibility maps // *Journal of data science*. 2011. 9. P. 65–81.
13. Purnomo Y., Pinem F. GIS analysis for determining of potential landslide area distribution pattern. A case study in Sumedang regency West Java Indonesia // *1st annual conference of the International society for integrated disaster risk management – IDRiM*. 2010. P. 63–66.
14. Rosin P.L. Unimodal thresholding // *Pattern Recognition*. 2001. 34 (11). P. 2083–2093.
15. Rosin P.L., Hervas J., Barredo J.I. Remote sensing image thresholding for landslide motion detection // In *1st Int. Workshop on Pattern Recognition Techniques in Remote Sensing*. 2000. P. 10–17.
16. Safaei, M., Omar, H., Yousof, Z. M., Vahed, G. Applying Geospatial Technology to Landslide Susceptibility Assessment // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2010. 15G. P. 677–696.
17. Saraf A., Das J., Rawat V. Satellite Based Detection of Early Occurring and Co-seismic Landslides // *J South Asia Disaster Stud (Journal of SAARC Disaster Management Centre)*. 2009. 2(1). P. 47–55.
18. Shabi H., Khezri S., Ahmad B. B., Allahvirdiasl H. Application of satellite images and fuzzy set theory in landslide hazard mapping in central Zab basin // *Journal of applied physics*. July–Aug. 2012. Vol. 1. Issue 4. P. 17–24.
19. Tofani V., Segoni S., Agostini A., Catani F., Casagli N. Technical Note: Use of remote sensing for landslide studies in Europe // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2013. 13. P. 299–309. doi:10.5194/nhess-13-299-2013.
20. Xiaojun Yang, Liding Chen. Satellite imagery for landslide mapping in an earthquake-struck area: a preliminary study // *24th International Cartographic Conference in Santiago, Chile*. 15–21 November 2009. 6p.
21. http://loi.ssc.ru/gis/dataplus/arcrev/Number_17/3_Svoistva.htm.