

## Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования при изучении экзогенных геологических процессов на примере оползней

И. О. Смирнова, А. А. Кирсанов

*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт  
имени А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, 199106, Россия  
E-mail: sio\_iv@mail.ru*

В связи с активным совершенствованием технологии получения и методов обработки данных дистанционного зондирования существенно расширились области практического использования дистанционных методов для изучения и мониторинга природных катастроф, вызванных экзогенными геологическими процессами, среди которых наиболее распространёнными являются оползни, приводящие к гибели людей и нанесению значительного материального ущерба. В статье приводится обзор и сравнительная оценка последних зарубежных и российских исследований оползней, проводимых с использованием различных дистанционных данных (мультиспектральных, в том числе в тепловых диапазонах, радиолокационных, лидарных, полученных со спутников, пилотируемых и беспилотных авиационных платформ) и новых методов их обработки для обнаружения, инвентаризации, картирования оползней, создания карт подверженности оползням, анализа опасности оползней, а также мониторинга оползней. Проанализированы факторы, вызывающие оползни. Отмечено, что анализ дистанционных данных должен осуществляться на базе геоинформационных систем в комплексе с ландшафтными, топографическими, геолого-геофизическими и полевыми данными, а также на основе математических моделей, созданных с помощью статистических методов, в том числе методов машинного обучения. Дана характеристика современному состоянию и перспективам развития методов дистанционного зондирования при изучении оползней.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования, оползни, экзогенные геологические процессы, мониторинг, методы обработки

Одобрена к печати: 31.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-26-48

### Введение

В последние годы в связи с глобальными изменениями климата значительно увеличилось количество природных катастроф, в том числе вызванных экзогенными геологическими процессами (ЭГП), одними из ведущих среди которых являются оползни, приводящие к гибели людей и нанесению ущерба инфраструктуре. Данные дистанционного зондирования (ДДЗ), преимущественно аэрофотоснимки (АФС), а с появлением спутников и космические снимки (КС), применялись для изучения оползней в течение многих десятилетий как в России, так и за рубежом. В начале XXI в. произошло активное совершенствование технологии получения и методов обработки ДДЗ. Значительно увеличилась группировка зарубежных и отечественных спутников, позволяющих получать цифровые снимки сверхвысокого (до 0,5 м) разрешения, мультиспектральные данные, в том числе в инфракрасном диапазоне. Развиваются методы пассивной и активной радиолокации с использованием современных радаров с синтезированной апертурой антенны, работающих с разной длиной волны и поляризацией и пространственным разрешением до 1 м, а также лазерные методы дистанционного зондирования. Сократились интервалы между повторными съёмками одной и той же территории, сроки передачи данных на наземный сегмент и непосредственно потребителям, что позволяет в режиме реального времени наблюдать происходящие изменения. Активно развиваются методы съёмки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В связи с этим существенно расширились области практического использования дистанционных методов для изучения и мониторинга опасных ЭГП, в том числе оползней.

Цель настоящей статьи — дать всесторонний обзор последних зарубежных и российских исследований оползней, проводимых с использованием ДДЗ и методов их обработки. Обзор может способствовать лучшему пониманию роли ДДЗ и дальнейших перспектив их использования для исследований оползней в различных масштабах.

## Состояние и перспективы использования ДДЗ для изучения оползней за рубежом

За рубежом исследованию и мониторингу оползней с использованием ДДЗ посвящено очень большое количество статей. Наиболее подробная обзорная информация об имеющихся публикациях содержится в разд. «Перспективы и методы дистанционного зондирования для картирования и изучения оползней», где проанализировано 129 публикаций с 1991 по 2019 г. (преимущественно начала 2000-х гг.) (Ray et al., 2020). Статьи по этому направлению публикуются в журнале *Remote Sensing*, в том числе в специальном выпуске «Дистанционное зондирование оползней» от 2017 г. (19 статей), и других журналах, а также в материалах международных симпозиумов (IGARSS, ISPRS), сессии NH3.8 Генеральной ассамблеи Европейского союза наук о Земле (EGU-2020) «Исследование оползней с использованием дистанционных и геофизических методов» и др. Из этих публикаций следует, что ДДЗ (мультиспектральные, в том числе в тепловых диапазонах, радиолокационные, лидарные, полученные с авиационных и космических платформ) широко используются при изучении оползней, включая обнаружение, инвентаризацию, картирование, создание карт подверженности оползням, анализ опасности оползней, а также их мониторинг.

Оползни могут быть вызваны различными природными явлениями (ливнями, цунами, наводнениями, землетрясениями) и антропогенными нарушениями (вырубка лесов, развитие инфраструктуры, наличие подземных выработок и т. д.). Подверженность оползням зависит от рельефа, крутизны и аспекта склона, геологического строения, гидрогеологических условий, землепользования и климата. Наиболее подвержены оползням горные районы с нестабильными склонами, берега рек, водохранилищ, морей, склоны в районах развития вечной мерзлоты. Опасность оползней можно разделить на высокую, умеренную и низкую в зависимости от объёма, продолжительности, скорости, а также расстояния от жилых домов, дорог и объектов инфраструктуры, которые могут быть разрушены при возникновении оползня. Все эти факторы необходимо учитывать при составлении *карт инвентаризации оползней и подверженности оползням* как регионального, так и локального уровня, поэтому анализ ДДЗ должен осуществляться на базе геоинформационных систем (ГИС) в комплексе с ландшафтными, топографическими, геолого-геофизическими данными и данными полевых исследований (Ray et al., 2020). Установление взаимосвязи между распределением оползней и вызывающих их факторов производится на основе *математических моделей*, созданных с помощью различных статистических методов и современных методов обработки изображений на основе классификаций с обучением и без обучения, в том числе с использованием методов искусственного интеллекта: машинного обучения (*англ.* Machine learning) и глубокого обучения (*англ.* Deep learning).

*Карта инвентаризации оползней* (кадастровая карта) идентифицирует оползни в исследуемом районе для установления пространственной корреляции между оползнями и факторами окружающей среды и эффективной количественной оценки оползневых явлений. Инвентаризация оползней включает определение местоположения, дешифровочных признаков, размера и объёма оползней, что помогает оценить опасность оползней и позволяет реализовать необходимые меры по смягчению их последствий. При составлении карт инвентаризации оползней проводится анализ разновременных АФС и КС, геоморфологических и геологических полевых наблюдений, а также данных исторических источников и архивных документов. Если карта инвентаризации отражает информацию о предыдущих оползнях, то *карта подверженности оползням* определяет потенциальные зоны оползней и информацию о будущих оползнях.

Ниже приведены примеры *обнаружения и инвентаризации оползней, создания карт подверженности оползням* с использованием различных ДДЗ и методов обработки данных в разных природных условиях и масштабах. Некоторые работы посвящены только инвентаризации оползней, другие — только созданию карт подверженности оползням, но большая часть объединяет и те, и другие исследования.

Для района, расположенного в провинции Цзянси (*англ.* Jiangxi) на юго-востоке Китая проведён подробный анализ факторов, вызывающих оползни, и методов обработки данных *при инвентаризации и прогнозировании оползней* (Li et al., 2020). В качестве вызывающих оползни факторов рассматривались топографические и геоморфологические факторы, полученные с цифровых моделей рельефа (ЦМР) (уклон, экспозиция, кривизна склона и рельефа), ландшафтные и гидрологические факторы, полученные по КС Landsat и АФС: нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index — NDVI), нормализованный индекс застроенных территорий (Normalized Difference Built Index — NDBI), расстояние до реки, модифицированный нормализованный водный индекс (Modification of Normalised Difference Water Index — MNDWI), геологические факторы (литология). Взаимосвязи 108 оползней и селевых потоков с вызывающими их факторами устанавливались с помощью 5 методов: вероятностной статистики (*англ.* Probability Statistics — PSs), отношения частот (*англ.* Frequency Ratio — FR), информативности (*англ.* Information Value — IV), индекса энтропии (*англ.* Index of Entropy — IOE) и веса признаков (*англ.* Weight of Evidence — WOE). На основе этих данных получены 4 модели: аналитический иерархический процесс (*англ.* Analytic Hierarchy Process — AHP), множественная линейная регрессия (*англ.* Multiple Linear Regression — MLR), дерево принятия решений C5.0 (*англ.* Decision Tree C5.0 — DT) и метод, заключающийся в использовании ансамбля решающих деревьев — «случайный лес» (*англ.* Random Forest — RF). Модель WOE-RF имеет самую высокую точность, высокое стандартное отклонение и является наилучшей для *прогноза* оползней.

Карта *инвентаризации оползней* для территории Северного Пакистана разработана на основе КС SPOT-5 с использованием характеристик рельефа (уклона и аспекта склонов), геологии, почвенного покрова, расстояния от разломов, дорог и ручьёв. *Карта подверженности оползням* составлена с помощью метода отношения частот (*англ.* Frequency ratio — FR), основанного на количественной связи между распределением оползней и каждым классом факторов, вызывающих оползни (Khan et al., 2019).

При составлении карт *подверженности оползням* для некоторых горных районов Пакистана применялись два алгоритма классификации с обучением: метод опорных векторов (*англ.* Support Vector Machines — SVM) и метод максимальной энтропии (*англ.* MaxENT). Из 112 исторических оползней 70 % использовались для обучения, а остальные — для валидации. Обе модели показали высокую эффективность (Shahzad et al., 2020).

Для разработки карт *инвентаризации, подверженности оползням и индекса опасности оползней* Южного Кыргызстана использовались методы автоматического *обнаружения* оползней по данным нескольких спутников (Landsat, SPOT (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre), ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), IRS-1C (*англ.* Indian Remote Sensing satellite), LISS III (*англ.* Linear Imaging and Self Scanning sensor) и RapidEye) на базе ГИС (Golovko et al., 2017).

Созданию карт *инвентаризации* оползней, обусловленных осадками, на лёссовом плато в Китае по КС китайского спутника Gaofen-1 с пространственным разрешением 2 м посвящена работа (Sun et al., 2017).

Новый подход к обработке ДДЗ и учёту веса признаков с применением алгоритма SVM для создания карт *инвентаризации и подверженности оползням* разработан для района в Западной Бенгалии (Индия). В качестве признаков в моделях использовались обуславливающие оползень факторы: количество осадков, высота, уклон, аспект склона, геоморфология, геология, текстура почвы, землепользование, растительный покров, вегетационный индекс (NDVI), топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index — TWI), индекс переноса наносов (Sediment Transport Index — STI), индекс мощности потока (Stream Power Index — SPI) и карты сейсмических зон. Карты подверженности оползням классифицированы на четыре

класса: низкой, средней, высокой и очень высокой степени подверженности оползням (Roy et al., 2019).

*Обнаружение и инвентаризация оползней*, произошедших на Филиппинах в районе г. Итогон в результате тайфуна Мангхут (*англ.* Mangkhut) в сентябре 2018 г., проводилось на основе классификации методом «случайный лес» — RF, где в качестве признаков использовались радиометрические характеристики каналов Sentinel-2, индексы, геоморфологические характеристики. Наилучшими индикаторами оползней оказались величина нарушения растительного покрова и геоморфологические характеристики (Abancó et al., 2020).

Следует отметить, что при *инвентаризации* оползней используются в основном оптические КС среднего, для отдельных участков высокого разрешения, но имеется пример актуализации карты *инвентаризации* оползней региона Тоскана (Италия) по спутниковым радарным данным ERS 1, 2 (*англ.* European Remote-Sensing Satellite) (1992–2000) и Envisat (*англ.* Environmental Satellite) (2002–2010) методом радарной интерферометрии (метод устойчивых отражателей — PS-InSAR). В результате обновления сокращено количество неклассифицированных оползней и выявлены различные типы оползней (оползни скольжения, обвалы, потоки), новые активные оползни. Разработаны карты: индекса скольжения, плотности и размеров оползней. Исследовалось распределение оползней в зависимости от геолого-геоморфологических признаков (литологии, высоты, уклона, кривизны склона и др.) (Rosi et al., 2018).

При создании карт *подверженности оползням* наиболее важными для моделей являются характеристики, полученные с ЦМР. В районе Рангамати в Бангладеш сравнивалась эффективность различных ЦМР: ЦМР по данным ASTER с разрешением 30 м, SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topographic Mission) (30–90 м), ЦМР по данным ALOS PALSAR (*англ.* Advanced Land Observing Satellite, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) (12,5 м) и по результатам топографической съёмки рельефа с разрешением 25 м. Использовались три метода оценки подверженности оползням: модифицированное отношение частот (двумерная модель), логистическая регрессия (многомерная модель) и метод «случайный лес» — RF (модель машинного обучения) с применением только производных от ЦМР факторов и с применением ЦМР и других общих факторов. Результаты показали, что SRTM обеспечивает самую высокую точность для двумерной модели в обоих сценариях, а ЦМР по ALOS PALSAR — для моделей логистической регрессии и RF (Rabby et al., 2020).

Карты *подверженности оползням* в районе Читтагонг (Бангладеш) разработаны на основе моделей с использованием карт изменений ландшафта и вегетационных индексов (NDVI), созданных по КС Landsat TM, OLI (*англ.* Operational Land Imager) и сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth), данных о количестве осадков, рельефе (ЦМР по данным ASTER), геологии, тектонике, влажности почв, карт инвентаризации оползней и факторов, вызывающих оползни. Создание моделей проводилось с помощью метода Демпстера – Шейфера и методов множественной регрессии (Ahmed, Dewan, 2017).

Картирование *подверженности оползням* проведено с использованием КС Landsat-8, Google Earth, ЦМР по данным ASTER и других характеристик на основе теории информации, кластерного анализа К-средних и статистических моделей в районе Трёх ущелий (Китай) (Wang et al., 2017), а также методом Rotation Forest (ансамбль «деревьев принятия решений» с поворотом признакового пространства) (Fang et al., 2021).

При оценке *подверженности оползням* в Камальдоли и на холме Аньяно (Неаполь, Италия) методом машинного обучения основное внимание уделялось взаимосвязи, существующей между возникновением оползней и районами, пострадавшими от лесных пожаров. Предполагается, что пожары действуют как предрасполагающий фактор, а основным пусковым фактором являются осадки. Оценено одиннадцать предрасполагающих факторов, создана база данных, состоящая из 400 оползней. Наличие спутниковых данных (композиций различных каналов КС) значительно улучшило возможности выявления районов, пострадавших от лесных пожаров, и проведения оценки выгоревших территорий (Di Napoli et al., 2020).

Создание карты *подверженности оползням* горы Умьен в Корее выполнено с использованием искусственной нейронной сети, включающей метод факторного отбора и различные

нелинейные активационные функции. Проведён анализ 151 оползня и 20 вызывающих оползень факторов, 11 из них были использованы в моделях (Lee et al., 2020).

Региональная оценка *подверженности оползням* в провинции Канвон (Корея) проведена с использованием АФС, геоморфологических характеристик, мощности почвенного слоя, данных об интенсивности осадков методом нечётких множеств (Park et al., 2017).

Для разработки карты *подверженности оползням* в глобальном масштабе использовались данные спутников об осадках: TRMM (*англ.* Tropical Rainfall Measuring Mission) и GPM (*англ.* Global Precipitation Mission) в сочетании с характеристиками склонов, геологией, зонами разломов, дорожных сетей и лесных территорий (Kirschbaum, Stanley, 2018).

*Обнаружение оползней и создание карт подверженности оползням* на юге Портленда в штате Орегон, США, с использованием КС Landsat-8 и Sentinel-2 проводилось методом нейронных сетей (Prakash et al., 2020).

Мультиспектральные КС Planet с пространственным разрешением 3 м использовались для автоматического *обнаружения оползней*, вызванных землетрясением 2018 г. в Ибури (Япония), методом глубокого обучения. 60 % площади использовалось для обучения модели, а остальные 40 % — для проверки точности модели. Результаты показали, что большинство ко-сейсмических оползней могут быть идентифицированы этим методом. Точность модели составила 0,7965 (Zhang et al., 2020).

Новый набор сверхточных нейронных сетей специально разработан для автоматизированного *распознавания оползней* и массовых смещений, выявляемых на нестандартных снимках. Полученные результаты могут быть использованы для поддержки автоматизированного наведения БПЛА (Catani, 2020).

Анализ вышеприведённых работ показывает, что для инвентаризации оползней и картирования подверженности оползням используются модели, основанные на взаимосвязи между распределением оползней и обуславливающих (рельеф, геологическое гидрогеологическое, тектоническое строение, растительность и др.), а также запускающих (осадки, сейсмичность, изменение температуры, техногенные нагрузки, в том числе пожары) их факторов, информация о которых (рельеф, вегетационные, почвенные индексы и др.) может быть получена по ДДЗ и геолого-геофизическим данным. Модели создаются с использованием различных статистических методов, среди которых преобладают методы машинного обучения (метод нейронных сетей и «случайный лес»).

Несколько отличается от приведённых выше исследований по *картированию оползней* работа, проведённая в районе р. Бакингхорс (Британская Колумбия, Канада), где по КС Landsat (1985–2017), КС Sentinel-2, лидарным данным и АФС, полученным с вертолёта, *закартировано* 66 оползней. Сделана попытка определения времени оползня методом вычисления разности между вегетационным индексом (NDVI) по КС Landsat и данными, полученными при подгонке одной гармонической функции ко всему временному ряду значений NDVI до и после оползня. Разность представляет собой гармоническую синусоидальную кривую (CDNDVI). Также получена кривая dCDNDVI в результате удаления из анализа полигонов с сезонными изменениями лесного покрова. Определено время 80 % оползней с использованием CDNDVI и 85 % оползней с использованием dCDNDVI. Средние ошибки (в днях) ниже для dCDNDVI (208 и 188), чем для CDNDVI (227 и 267). Однако существуют экстремальные выбросы с очень большими ошибками (>1000 дней) (Deijns et al., 2020).

Проблема *обнаружения оползней* по гиперспектральным данным пока разработана слабо. Представляет интерес работа китайских исследователей, предлагающих систему глубокого обучения многослойных нейронных сетей для обнаружения оползней на гиперспектральном изображении, включающую: извлечение спектральных характеристик оползня, где каждый последующий слой получает на входе выходные данные предыдущего слоя; включение высокоуровневых признаков, производных от признаков более низкого уровня, в классификатор логистической регрессии для проверки характеристик оползня. Результаты показали, что точность обнаружения оползня на изображении, полученном предложенным методом, может достигать 97,91 %, тогда как точность классификации гиперспектральных данных традиционными методами оказалась ниже: методом опорных векторов —

94,36 %, расхождения спектральной информации — 84,50 %, спектрального угла — 86,44 % (Ye et al., 2019).

Многие публикации посвящены использованию оптических данных высокого разрешения, радарных данных, а также обоих типов данных для *мониторинга деформаций и смещений* оползней. Поскольку при мониторинге требуются долговременные наблюдения, часто используются снимки, полученные разными системами, в различных условиях (разное время, угол и направление визирования и др.).

Для определения *деформаций и смещений* оползней по разновременным оптическим данным высокого разрешения часто используются различные программные пакеты цифровой корреляции изображений. Так, для корреляции разновременных АФС при определении *деформации склонов* на территории Швейцарских Альп использовались алгоритмы: нормализованной перекрёстной корреляции (*англ.* Normalized Cross Correlation — NCC), быстрого преобразования Фурье (*англ.* Fast Fourier Transformation — FFT) и алгоритм совместной регистрации и корреляции оптических изображений (*англ.* Co-Registration of Optically Sensed Images and Correlation — Cosis-Corr) (Bickel et al., 2018).

Возможности использования алгоритмов корреляции ортотрансформированных КС SPOT-5 с разрешением 2,5 м (MicMac и Cosis-Corr) оценивались при выявлении *деформаций оползня*, расположенного в горном районе с густой растительностью на о. Режуньон (Франция). Исследования, проведённые для временных интервалов с 2002 по 2005 г. (низкая активность оползня) и с 2006 по 2008 г. (высокая активность), показали, что при использовании обоих алгоритмов обнаруживаются смещения (8,5 м) в период высокой активности, а медленные смещения в период низкой активности не определяются. Отмечается, что лучшие результаты цифровой корреляции могут быть получены в районах, лишённых растительности, а в сложных условиях, как у исследуемого оползня, полученные смещения должны быть скорректированы с учётом сдвига, измеренного на контрольных точках, расположенных в стабильных областях (Bivic et al., 2017).

Перспективность различных КС (Sentinel-2, RapidEye, PlanetScope), а также изображений, полученных с БПЛА, для *обнаружения, мониторинга и идентификации* быстрых изменений до оползней и возможностей *их прогноза* определялась на примере высокогорного цирка в Австрии с помощью методов цифровой корреляции изображений. Модели смещения, полученные по изображениям БПЛА, показали более высокую точность, чем модели по данным спутниковых систем (Hermle et al., 2020).

*Мониторинг* расположенного на глинистых почвах оползня Гармальер (Западные Альпы, Франция) проводился по КС Sentinel-2 в сочетании с КС высокого разрешения (Pleiades) в период с 2016 по 2019 г. Анализ скорости смещений, полученных по этим КС, позволил обнаружить признаки реактивации оползней (Jongmans et al., 2020).

Возможности мультиспектральных КС Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м для *обнаружения предшествующих движений* перед быстрыми оползнями исследовались во Французских Альпах на примере крупного оползня, возобновившегося в июне 2016 г. Анализ 9-месячного временного ряда смещений по данным Sentinel-2 выявил 7-месячный период низкой активности ( $\leq 1$  м), за которым последовало внезапное ускорение  $3,2 \pm 1,2$  м за 3 дня до массового оползания. Здесь же по АФС и лидарным данным обнаружены медленные движения, происходящие с 2001 г. (около 1 м/год). Благодаря высокой повторяемости съёмки (5 дней) данные Sentinel-2 имеют хорошие перспективы для мониторинга оползней и выявления их предвестников — изменений активности движений за очень короткий промежуток времени (дни) (Lacroix et al., 2018).

В течение последних 10 лет специалисты Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле (GFZ — Helmholtz center) (Потсдам) осуществляют методологические разработки в области анализа временных рядов оптических и радарных данных, включающие автоматизированное *обнаружение и картирование оползней*, а также оценку кинематики эволюции склонов до и после оползневого процесса. Обнаружение изменений, связанных с внезапным разрушением растительного покрова и его восстановления после оползней, проводится при помощи подсчёта вегетационного индекса (NDVI). В сочетании с анализом ЦМР этот подход

позволяет идентифицировать оползни различных размеров, формы, разного времени образования (например, новые оползни или активизированные оползни) в разных природных условиях. Представлено применение этой методики в Кыргызстане для ретроспективного анализа оползней (1986–2013), *картирования и мониторинга* оползней (2009–2016), а также в Непале для анализа динамики оползня (2011–2015), вызванного Горхинским землетрясением и сезонными дождями до и после оползня (Behling, Roessner, 2017). Отмечается, что регулярный *мониторинг оползнеопасных регионов* по КС высокого разрешения имеет ключевое значение для характеристики и моделирования пространственно-временной эволюции оползней, вызванных различными причинами и предрасполагающими факторами, например оползней, случившихся в результате землетрясения Кайкура в Новой Зеландии (ноябрь 2016 г.), тайфуна Моракот на Тайване (август 2009 г.), а также менее интенсивных осадков, сохраняющихся в течение необычно длительных периодов времени, как это наблюдалось в Центральной Азии (весна 2017 г.) и Иране (весна 2019 г.). Из-за большой протяжённости затронутых районов (до нескольких десятков тысяч квадратных километров) новые возможности открылись с увеличением доступности ДДЗ подходящего пространственного и временного разрешения (Sentinels, Planet), а также с достижениями в области *мониторинга и картографирования* с очень высоким разрешением на основе БПЛА, используемых в том числе для создания ЦМР. Приведены примеры использования БПЛА для мониторинга оползней Согот и Чангет в Кыргызстане (Roessner et al., 2020).

*Обнаружение и мониторинг* оползней в провинции Голестан (Северный Иран), вызванных сильными дождями и наводнениями в конце марта – начале апреля 2019 г., осуществлялось полуавтоматическим способом с использованием временных рядов оптических КС Sentinel-2 и КС высокого разрешения Planet. Ведущий индикатор для обнаружения оползней — индекс NDVI. Проведён мониторинг деформаций по радарным данным Sentinel-1В методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR) для изучения явлений, предшествующих катастрофическому оползню Хоссейн Абад Калпуш (апрель 2019 г.). Исследовано влияние метеорологических и антропогенных факторов на активизацию оползня (Motagh et al., 2020).

Методология и программное обеспечение для создания ортомозаик изображений высокого разрешения и ЦМР, полученных с помощью БПЛА, для *мониторинга смещений* в отвалах трёх мраморных карьеров в Турции представлены в работе (Hastaoglu et al., 2019).

*Картирование оползней* на Черноморском побережье Турции с использованием изображений, полученных с БПЛА и обработанных методом объектно-ориентированной классификации, показало высокую эффективность (Comert et al., 2019).

Преимущества использования ортоизображений высокого разрешения и ЦМР, полученных с помощью БПЛА, для *мониторинга* медленно движущихся оползней на побережье о. Мальта представлены в исследовании (Devoto et al., 2020).

В ряде работ обосновывается перспективность использования тепловой съёмки для *мониторинга* оползней. Итальянскими исследователями оценены преимущества и ограничения метода инфракрасной термографии для изучения различных типов неустойчивости склонов (оползни, обвалы, потоки). Метод применялся для *обнаружения, картирования и мониторинга* оползней с наземных и авиационных платформ в комплексе с другими методами, такими как наземное лазерное сканирование и глобальные системы позиционирования (Global Positioning System — GPS). Выявлялись потенциально опасные структурно-морфологические особенности (структурные разрывы, открытые трещины, уступы, зоны просачивания и увлажнения, оползневая дренажная сеть и водоёмы) (Frodella et al., 2017).

Перспективность установки тепловизионных камер на БПЛА для *мониторинга* береговых оползней обосновывается в обзоре итальянских исследователей (Melis et al., 2020). Отмечается, что даже с больших расстояний можно различить объёмы оползневых тел по тепловым контрастам. Нестабильные области могут распознаваться путём обработки полученных тепловизионных изображений в различное время суток благодаря более высокой способности тела оползня передавать тепловую энергию по сравнению с окружающими породами за счёт наличия циркуляции воздуха внутри пустот и систем трещиноватости. БПЛА могут ве-

сти съёмку с разных ракурсов, что позволяет определять устойчивость вертикальных клифов в труднодоступных районах.

Эффективность интеграции методов инфракрасной термографии и интерферометрии (DInSAR) для *мониторинга оползней* продемонстрирована на примере одного из крупнейших оползней Рандаццо на северо-востоке Сицилии (Италия), спровоцированного сильными дождями в 1996 г. Спустя более чем 20 лет склон ещё подвержен нестабильности и обнаружены признаки реактивации (деформация и растрескивание дорожного покрытия). Применение инфракрасной термографии позволило выявить области с различной температурой поверхности, связанные с растительностью, крутыми склонами, обнажёнными участками, контактами между породами, и обнаружить зарождающиеся оползни и древние оползневые тела. Участки оползневых смещений, полученные с помощью DInSAR, в основном совпадают с областями, выделенными по тепловым снимкам (Pappalardo et al., 2018).

Методы дифференциальной интерферометрии (DInSAR, InSAR) широко используются при *мониторинге* оползней. В результате интерферометрической обработки пары снимков DInSAR (Differential InSAR) или серий разновременных снимков MTI InSAR (MultiTemporal InSAR) строятся проекции скорости смещения поверхности на линию визирования спутника в период между съёмками. Метод InSAR включает две модификации: метод устойчивых отражателей — PS-InSAR и метод коротких интерферометрических баз — SBAS. Склоны, на которых фиксируются аномальные по величине значения скорости смещений, как правило, являются активными оползневыми склонами. В Европейском космическом агентстве (European Space Agency — ESA) разработана платформа для изучения геологических опасностей (Geohazard Exploitation Platform — GEP), с помощью которой выполняется анализ КС. На этой платформе размещено несколько тематических приложений, которые позволяют выявлять, отслеживать и оценивать опасности, связанные с геологическими процессами (вулканизм, оседание грунта, оползни). Служба Sentinel-1 CNR-IREA SBAS является одним из таких приложений, состоящим из цепочки обработки DInSAR для *генерации временных рядов деформации Земли и карт средних скоростей поверхностного смещения грунта* (Reyes-Carmona et al., 2020).

*Карта скоростей смещений* получена по району развития береговых оползней на побережье Гранады в Андалусии (Испания) обработкой временных рядов 139 радарных КС Sentinel-1A/B методом InSAR. Проведены выделение и классификация наиболее значительных активных зон смещения и детальный анализ выбранных прибрежных оползней. Карта смещений, полученная по результатам InSAR, в основном совпадает с картой смещений этих оползней на основе полевых съёмок (Barra et al., 2020).

*Мониторинг* прибрежного оползня в районе Маяка Тазонес (Северная Испания) проводился методом DInSAR по КС Envisat с 2002 по 2012 г. и по КС Sentinel-1 с 2014 по 2019 г. для получения *временных рядов деформации и карты скорости деформации*. На базе ГИС выполнялись объединение и сопоставление результатов DInSAR с топографическими данными. Результаты DInSAR показали скорости смещений от миллиметра в год до метра в год, которые согласуются с наземными измерениями (Cuervas-Mons et al., 2020).

Результаты *мониторинга* оползневых процессов в бассейне р. Карнали (Непал) по радарным данным Envisat и Sentinel-1A методом InSAR (PSI/SBAS) показали, что этот метод может успешно использоваться для оценки медленно движущихся масс от сантиметров до нескольких дециметров в год или глубинных деформаций склона, приводящих к частичной или полной реактивации оползня (Schiller et al., 2020).

*Мониторинг* оползня Койташ, расположенного в долине р. Майлы-Сай (Кыргызстан) и реактивированного весной 2017 г. в результате сильных дождей, проводился сравнением разновременных ЦМР (спутниковых и полученных с БПЛА) и методом DInSAR. Вычисление временных рядов деформаций позволило выявить смещения склонов и оценить эволюцию скоростей смещений во времени. Этот анализ выявил медленные смещения в течение месяцев, предшествовавших реактивации, что указывает на активность оползня Койташ задолго до реактивации в апреле 2017 г. Вычисление по оптическим изображениям (SPOT, Pléiades) индекса NDVI выявило изменения растительного покрова, связанные с процессом скольжения (Piroton et al., 2020).

Методика оценки *интенсивности оползней* и создания карт *деформаций и рисков* с определением объектов, которые ранжируются по потенциальному ущербу или риску, на основе анализа разновременных радарных изображений Sentinel-1 методом InSAR опробована на северо-западе Италии в районе крутых склонов р. Дора-Бальтеа с широким распространением оползней (Solari et al., 2020).

Для оценки *формы и глубины поверхности скольжения оползня* на основе радарной интерферометрии по данным ERS, Envisat и Sentinel-1 с восходящей и нисходящей орбит использовался метод наклона векторов движения вдоль поперечного сечения (*англ.* Vector Inclination Method — VIM) для оползней, характеризующихся различными типами движения, кинематикой и объёмом (Италия). Сопоставление результатов с геофизическими данными подтвердило достоверность VIM (Intrieri et al., 2020).

Многовременная *оценка состояния оползневой активности* в бассейне Абруцци, (Италия) проводилась на основе геоморфологических данных и прошлых измерений смещения грунта, полученных InSAR (Bozzano et al., 2017).

Для *мониторинга оползня* Канильо (Андорра) методом радарной интерферометрии были использованы различные стратегии идентификации устойчивых отражателей (PS, *англ.* persistent scatterer) по 32 изображениям TerraSAR-X (TSX) сверхвысокого пространственного разрешения. Данные TSX позволяют получить более высокие плотности PS по сравнению с данными с более низким пространственным разрешением (Sentinel-1A) (Zhao et al., 2018).

Известны примеры использования не только фазовой, как при интерферометрии, но и амплитудной радарной информации при *мониторинге оползней*. Изображения высокого разрешения, полученные с помощью CosmoSkyMed (X-диапазон) до и после катастрофических оползней на п-ове Кии в центральной части Японии, вызванных сильными дождями в результате тайфуна Талас в 2011 г., использованы для *обнаружения* оползней. Вычислялись разность коэффициентов обратного рассеяния и корреляция интенсивности, отражающие изменения почвенного покрова до и после катастрофы (Konishi, Suga, 2018).

Влажность почвы является важной характеристикой *при оценке потенциальной неустойчивости склонов* при оползнях. Девятимесячный временной ряд оценок влажности почвы, полученных с помощью радарных данных CosmoSkyMed, в оползневом районе в Северном Йоркшире (Великобритания) и их сравнение с данными наземных измерений представлены в работе (Bliss et al., 2020).

## Состояние и перспективы использования ДДЗ для изучения оползней в России

В России работы по мониторингу ЭГП, в том числе оползней, осуществляются Центром государственного мониторинга состояния недр и региональных работ ФГБУ «Гидроспецгеология» на основании оперативных материалов и информационных сводок, представляемых Северо-Западным, Центральным, Южным, Северо-Кавказским, Приволжским, Уральским, Сибирским и Дальневосточным региональными центрами государственного мониторинга состояния недр. Преимущество отдаётся наземным инженерно-геологическим исследованиям на специально организованной опорной сети. Методическими нормативными документами предусматривается использование ДДЗ при ведении мониторинга ЭГП (Временные..., 2000; Инженерно-геологические..., 2003; Методические..., 1997 и др.). Но как показывает анализ материалов российских отраслевых конференций и совещаний («Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://conf.rse.geosmis.ru>), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (<http://geosib.sgugit.ru>) и др.), а также научных статей, опубликованных в последние годы, вопросами использования ДДЗ для исследования и мониторинга ЭГП занимаются различные научные организации. Значительный интерес к использованию ДДЗ для изучения оползней возник при строительстве олимпийских объектов в Сочи, мониторинге катастрофического оползня на р. Бурее и ряде региональных исследований.

С 2011 г. в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН проводятся исследования в области применения радарной интерферометрии *для изучения оползневой активности*

в районе Черноморского побережья Кавказа с использованием радарных снимков в разных частотных диапазонах. Вопросы применения методов радарной интерферометрии (InSAR) в районе Большого Сочи для *обнаружения, мониторинга движений оползней и оценки оползневой риска* рассмотрены в работе (Смолянинова и др., 2018). До начала строительства олимпийских объектов на этой территории надёжные результаты были получены с использованием КС со спутника ALOS PALSAR (2007–2010) L-диапазона (23,5 см) с высокой проникающей способностью. КС Sentinel-1 С-диапазона обладают более низкой когерентностью в условиях густой растительности, однако с учётом того, что регулярная съёмка этой территории проводится с интервалом в 6–12 дней и снимки можно получить по сети интернет уже через несколько часов после съёмки, применение этих КС для изучения оползневой опасности в районе Большого Сочи представляется весьма перспективным. Карта оползневых участков по данным InSAR построена по результатам расчётов полей смещений с использованием КС Sentinel-1A с восходящей и нисходящей орбит за период 2015–2016 гг. Интерферометрическая обработка проводилась с применением методов DInSAR и PS-InSAR, реализованных в программных пакетах SNAP и StaMPS/MTI, и метода SBAS (ENVI SARscape). Комплексирование различных методов обработки КС Sentinel-1 позволило выявить активные, периодически активизирующиеся и временно стабильные оползневые склоны, а также новые медленные оползни, которые не отмечены по наземным данным. В то же время часть оползней, находящихся на залесённых склонах и зафиксированных наземными методами, по данным Sentinel-1 не обнаруживается. Проанализирована динамика смещений ряда активных оползней и оползня в экстрим-парке «Роза Хутор». Показано, что вырубка леса и возведение спортивных объектов привели к активизации оползневых процессов в пределах древнего оползня.

Аналогичные работы проведены по 350 радарным КС со спутников Sentinel-1A/B с восходящих и нисходящих орбит в прибрежной части Большого Сочи на участке от пос. Лоо до Адлера за три года (2015–2018). Интерферометрическая обработка КС позволила выделить все крупные оползневые районы. Однако границы небольших по площади областей активных деформаций по данным интерферометрии и наземным данным не всегда совпадают. На КС участки с плотной индивидуальной застройкой обладают существенно лучшей когерентностью, чем покрытые растительностью участки без зданий и сооружений, поэтому оценить смещения по КС на застроенной территории гораздо легче, чем на незастроенной. Наземными методами смещения на застроенных территориях практически не фиксируются, но выявляются оползни на незастроенных склонах. Этим определяется целесообразность совместного применения интерферометрии и наземных методов в системах *мониторинга* (Смолянинова и др., 2019). В 2019 г. работы в районе Адлера были продолжены. Проведено сопоставление КС Sentinel-1A за 2019 г. с более ранними, в том числе: ALOS-1 (2007–2010), Envisat (2011–2012) и Sentinel-1A (2015–2019), построены *карты скоростей деформаций*. Более подробно рассмотрены оползневые участки в населённых пунктах в окрестностях р. Мзымты. У радаров бокового обзора возникают зоны наложения и тени на снимках. При съёмке с разных орбит (под разными углами визирования) эти зоны не совпадают, поэтому карты, полученные по данным о смещениях поверхности с нескольких треков, обладают более высокой информативностью (Смолянинова и др., 2020).

Для *мониторинга* оползневых склонов в районе Сочи проведён эксперимент по применению метода дифференциальной радарной интерферометрии в условиях сильной временной декорреляции отражённых сигналов подстилающей поверхности на КС TerraSAR-X X-диапазона. Измерения подвижек поверхности оползня осуществлялись с использованием стабильно отражающих объектов — специально разработанных трёхгранных уголкового отражателей. В обработке использованы четыре КС TerraSAR-X и ЦМР по данным геодезического нивелирования. Эксперимент показал возможность миллиметровой точности измерения смещений отражающей поверхности оползневого склона с установленными на нём уголковыми отражателями (Захаров и др., 2018).

Возможности современных средств спутникового *мониторинга* рассмотрены на примере скального оползня в районе р. Буреи 11 декабря 2018 г., в результате которого произошло

перекрытие речного русла. Многочисленные научно-исследовательские коллективы из Москвы, Фрязино, Улан-Удэ, Хабаровска, Владивостока провели сбор ДДЗ видимого и инфракрасного диапазонов, радиолокационной съёмки, данных наземных работ, их обработку и анализ полученных результатов по исследованию процессов подготовки и регистрации катастрофического события и его последствий, наблюдение за ходом взрывных работ и устройством прорана, в том числе с использованием системы Vega-Science Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Лупян и др., 2019). Эти исследования нашли отражение в публикациях в журналах «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (<http://jr.rse.cosmos.ru>), «Исследования Земли из космоса», в докладах 17-й и 18-й конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса».

Количественная оценка зоны обрушения проведена по мультиспектральным КС Sentinel-2B, полученным 09.12.2018 до обрушения и 12.12.2018 после обрушения. Определение времени обрушения проведено по данным, полученным прибором АНИ (англ. Advanced Himawari Imager), установленном на спутнике Himawari-8. Выявлена температурная аномалия (более чем на 2 °С), возникшая 11.12.2018 в 04:30 в канале 3,9 мкм и в 04:40 в канале 11,2 мкм, вероятно, в результате выплёскивания относительно тёплой воды из-за схода грунта на поверхность льда. Примерно к 08:00 температурная аномалия в районе обрушения исчезает, так как вода на поверхности начинает остывать, замерзает (Крамарева и др., 2018).

Для оценки морфометрических параметров оползня и его последствий использовались мультиспектральные КС Sentinel-2, ЦМР по радарным данным (SRTM), полевые данные. Для определения физических размеров первоначального (на склоне) и конечного (в ложе водохранилища) оползневого тела в программной среде ArcGIS 10.5 были построены цифровые модели поверхности скольжения (по данным спутниковых геодезических измерений (ГНСС-съёмки)) и поверхности оползня (по данным ГНСС-съёмки и промеров глубин). Оценка площадных параметров воздействия волны, вызванной сходом оползня, и определение её высотных характеристик проводились на основе анализа КС Sentinel-2, полевых измерений и фотоматериалов, высотных характеристик рельефа в векторном формате. Выделены территории, где вследствие воздействия воды был уничтожен лес, построены изолинии, характеризующие высоту волны, в зоне максимального воздействия достигающей 55–60 м (Остроухов и др., 2019).

Постоянный мониторинг района обрушения проводился с использованием различных спутников и методики анализа пространственно-временных изменений морфометрических характеристик водных объектов суши, применяемой в Дальневосточном центре НИЦ «Планета», а также инструмента анализа данных системы Vega-Science ИКИ РАН. Начало проведения взрывных работ по расчистке насыпи было зафиксировано на мультиспектральном изображении, полученном со спутника Sentinel-2A 21.01.2019. Размеры зоны расчистки составили 116 м в длину и 50 м в ширину. На изображении со спутника «Канопус-В» (22.01.2019) размеры увеличились до 183 м в длину и 65 м в ширину. Наблюдения по КС Sentinel-2 с 16.01.2019 по 25.02.2019, проводившиеся через 2–3 дня, позволили проследить динамику проведения взрывных работ и устройство прорана в насыпи, образовавшейся вследствие схода скальных пород на р. Бурее, определить дату начала прохода воды через проран и оценить линейные размеры канала (Крамарева и др., 2019а). Дальнейшие наблюдения за динамикой прорана (изменением формы канала и уменьшением его ширины) проведены по КС Sentinel-2, данным Международной космической станции (МКС) и БПЛА (Крамарева и др., 2019б).

Особенности формирования и механизма развития Бурейского оползня рассмотрены на основе анализа геолого-геоморфологического строения территории, в том числе по результатам дешифрирования КС, данных полевых работ, сейсмологического мониторинга и результатов моделирования условий устойчивости склона. Выделено три этапа развития оползня: 1) образование оползня сдвига (по типу «клин»), трансформировавшегося в каменную лавину протяжённостью более 700 м, двигавшуюся со скоростью до 25–26 м/с в сторону водохранилища, что обусловило формирование воздушной волны и «волны заплеска», приведших

к уничтожению тайги на склоне до высоты 60 м; 2) перемещение из восточной части цирка крупного (260×280 м) блока горных пород, сопровождавшееся формированием каменной лавины протяжённостью до 860 м, движущейся со скоростью от 17–18 до 42 м/с; 3) формирование вторичных оползней на флангах цирка и склонах завальной плотины (Зеркаль и др., 2019).

Наблюдение *динамики зоны оползня* на р. Бурее по радарным КС Sentinel-1 в период с конца 2016 г. по декабрь 2018 г. проведено методами дифференциальной интерферометрии. Измерены смещения поверхности оползневого склона в холодное время года, когда интерферометрическая когерентность отражённых поверхностью сигналов достаточно высока. Из-за низких значений когерентности в тёплое время года измерения смещений поверхности оказались невозможны, однако по характеру изменения когерентности во времени сделано предположение о резкой активизации оползневых процессов в конце весны 2018 г. Предполагается, что предвестники схода оползня в декабре 2018 г. могли наблюдаться двумя годами ранее (Захарова, Захаров, 2019).

Результаты обработки радарных КС PALSAR L-диапазона методом дифференциальной интерферометрии с применением ЦМР по данным TanDEM-X (пространственное разрешение 5 м) зоны Бурейского оползня в десятилетний период показали, что *смещения почв по склону* в 2006–2010 гг. составляли 1,6–1,9 см/мес, в 2015–2016 гг. возросли до 4,7–4,9 см/мес, а максимальная скорость смещений (10,7 см/мес) достигнута летом 2016 г. Предполагается, что активизация оползневого процесса пришлась на время завершения наполнения чаши водохранилища (2006–2009) и спровоцирована как первоначальным подъёмом, так и сезонными колебаниями уровня воды. Показано, что летние КС менее информативны из-за резкой потери когерентности вследствие обильных дождевых осадков, а зимние пары снимков обладают высокой когерентностью вследствие стабильности диэлектрических свойств древесной растительности и почв. Временная стабильность отражений L-диапазона оказывается более высокой по сравнению с радарными C-диапазона (Бондур и др., 2019а, б).

По результатам *мониторинга оползневой зоны* на р. Бурее в 2018–2019 гг. по радарным и оптическим КС системы Sentinel выявлена продолжающаяся оползневая активность в пределах оползневого цирка и обрушения береговой линии. Методы дифференциальной радарной интерферометрии позволили выявить стабильность поверхности оползневого склона в первые четыре месяца после обвала и с конца июля 2019 г., а также мелкомасштабную динамику поверхности в пределах оползневого цирка. Показано, что методы интерферометрии малопригодны для наблюдения крупномасштабных изменений береговой линии в отличие от оптических снимков, где эффекты обрушения фрагментов берега и его затопления оказались хорошо видны, в том числе по сравнению с амплитудными радарными изображениями (Бондур и др., 2019в).

Помимо данных автоматических систем для *мониторинга* заваленного участка русла р. Бурей использовались данные, полученные в ходе космического эксперимента «Сценарий», проводимого на борту МКС. Экипажем МКС отснято несколько сотен разновременных фотографий зоны интереса. Эти данные обработаны и сделаны доступными для анализа и оценки обстановки в зоне оползня в системе Vega-Science ИКИ РАН совместно с данными Landsat-8, Sentinel-2 и др. (Беляев и др., 2019).

*Картирование и мониторинг оползней* проводятся также в рамках региональных исследований ЭГП. *Карта развития опасных ЭГП* вдоль трубопроводной системы, пересекающей Среднюю и Южную Сибирь и Приамурье, составлена на базе ГИС по результатам мониторинга с применением данных GeoEye, QuickBird, WorldView-1, -2, ЦМР и наземных работ. В результате дешифрирования КС выявлены участки трассы с различной степенью опасности и динамики проявлений ЭГП, в том числе оползней (Викторов и др., 2018).

*Автоматизированное крупномасштабное картографирование и анализ опасных ЭГП*, в том числе оползней, проведены в пределах Тункинской котловины с применением ЦМР, КС и ГИС-технологий. Построены карты природных характеристик, которые отвечают за распространение ЭГП: гипсометрическая карта, карта крутизны и экспозиции склонов, карты показателей NDVI, индекса влажности и эрозионного смыва, являющиеся основой карты

опасных ЭГП Тункинской котловины (Безгодова, Распутина, 2020). Аналогичным образом создана крупномасштабная карта ЭГП в пределах Мондинской котловины (Безгодова и др., 2018).

Выявление мест *локализации опасных ЭГП и их динамики* на территории Харасавэйского месторождения (п-ов Ямал) осуществлялось визуальным и автоматизированным методом с применением технологии объектно-ориентированного дешифрирования КС разных лет, основанной на геометрических, спектральных и текстурных свойствах объектов. При выделении границ растительных сообществ, заболоченных и обводнённых участков используются синтез в цветах, близких к естественным, и синтез в «псевдоцветах» (ближний инфракрасный, красный и зелёный каналы). Установлено, что преобладающее развитие имеют оползни-сплывы (криогенные оползни скольжения), овражная термоэрозия, солифлюкция. Выявлено 226 участков развития *криогенных оползней-сплывов*, в том числе активные оползни, находящиеся в стадии формирования, и древние оползни со слабо выраженными морфологическими признаками. 29 участков развития криогенных оползней-сплывов представляют потенциальную угрозу для проектируемых сооружений, где требуется разработка мероприятий по инженерной защите. Большая часть (до 80 %) всех зафиксированных активных оползней возникла в период с 2012 по 2013 г., характеризующийся повышенным количеством осадков и высокой температурой (Меньшиков и др., 2016).

Для *оценки развития оползневых процессов* на территории Барнаула по разновременным КС Landsat-7, -8 и Quickbird с разрешением 2 м выполнен анализ изменений методом Change detection (ERDAS IMAGINE), основанном на определении яркостных различий и создании маски зон изменений (Солонько, Хлебникова, 2016).

При *исследовании природных опасностей и рисков* с целью обеспечения безопасного освоения и развития горных территорий показана эффективность и оперативность БПЛА по сравнению с традиционными системами дистанционного зондирования (Караев, 2017).

## Заключение

Из представленных материалов следует, что ДДЗ (мультиспектральные, в том числе в тепловых диапазонах, радиолокационные, лидарные, полученные с космических авиационных платформ и БПЛА) в связи с обширным охватом территорий и частотой наблюдений, особенно в высокогорных и труднодоступных районах, успешно используются при изучении оползней, включая обнаружение, инвентаризацию, картирование, прогноз оползней, создание карт подверженности оползням, анализ опасности оползней, а также мониторинг оползней. Своевременная и качественная информация, полученная с помощью ДДЗ, может помочь в борьбе со стихийными бедствиями и техногенными катастрофами и снизить риск бедствий.

КС оптического диапазона среднего разрешения в основном применяются для обнаружения оползней и составления карт инвентаризации оползней с учётом длинных временных рядов Landsat TM/ETM, SPOT-1–5, ASTER, Sentinel-2, RapidEye и др. При составлении карт подверженности оползням проводится установление взаимосвязи между распределением оползней, а также обуславливающих (литология, рельеф, геологическое строение) и запускающих (осадки, сейсмичность, изменение температуры, техногенные нагрузки) их факторов, осуществляемое на базе ГИС и на основе *математических моделей*, созданных с помощью различных статистических методов с использованием современных методов обработки изображений: классификаций с обучением и без обучения, в том числе методов машинного обучения, наиболее часто употребляемыми из которых в зарубежных исследованиях являются метод Random Forest («случайный лес») и метод нейронных сетей. Эти методы позволяют при использовании большого количества признаков, даже имеющих небольшой вес, значительно улучшить качество модели. Наиболее часто используемые признаки, полученные с помощью ДДЗ, — это данные о рельефе (ЦМР и их производные), растительности и почвах (вегетационные, почвенные и другие индексы), геологии, гидрологии, землепользовании, антропогенной нагрузке. При мониторинге оползней и количественной оценке смещений предпо-

чение отдаётся оптическим КС высокого разрешения (GeoEye, QuickBird, WorldView и др.), АФС, изображениям с БПЛА, а также результатам интерферометрической обработки всепогодной радарной съёмки. Освещены преимущества и недостатки обработки радарных данных различных диапазонов. Так, изображения X-диапазона (COSMO-SkyMed, TerraSAR-X/TanDEM-X), обладающие наилучшим пространственным разрешением, но низкой проникающей способностью, показывают хорошие результаты на обнажённых склонах и при использовании уголковых отражателей. Данные ALOS PALSAR L-диапазона, особенно полученные в зимнее время, демонстрируют надёжные результаты для оценки смещений и обладают более высокой временной стабильностью отражений по сравнению с радарными C-диапазона (Sentinel-1 и др.). Однако данные Sentinel-1 имеют высокие перспективы благодаря свободному доступу и высокой повторяемости съёмки.

Анализ российских и зарубежных публикаций позволяет отметить, что в области мониторинга оползней российскими исследователями продемонстрированы значительные достижения, особенно в вопросах использования радарной интерферометрии. Что касается создания карт инвентаризации, подверженности оползням и разработки моделей с использованием ДДЗ, здесь российские исследователи уступают зарубежным. По мнению авторов, необходима постановка научно-исследовательских работ для создания нормативных документов и рекомендаций по использованию ДДЗ при картировании, мониторинге и прогнозе оползней и других опасных ЭГП с учётом новых систем дистанционного зондирования и современных технологий обработки данных. Следует уделить внимание вопросам использования гиперспектральных данных, так как они позволяют уверенно выделять участки гидротермальных изменений пород и распространения глинистых отложений, являющихся предрасполагающим фактором для возникновения оползней на труднодоступных горных склонах. Результаты дистанционного зондирования могут и должны использоваться как один из наиболее эффективных инструментов для изучения динамики ЭГП и разработки мероприятий по защите от стихийных бедствий.

## Литература

1. Безгодова О. В., Распутина Е. А. Автоматизированное картографирование опасных экзогенных процессов Тункинской котловины с применением ГИС-технологий // Геодезия и картография. 2020. № 3. С. 8–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-957-3-8-20.
2. Безгодова О. В., Истомина Е. А., Овчинникова Е. В. Оценка и картографирование опасных экзогенных процессов Мондинской котловины на основе морфометрического ландшафтного анализа // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. № 8. С. 28–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-938-8-28-37.
3. Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Буцнев М. А., Балашов И. В., Есаков А. М., Толпин В. А. Использование данных КЭ «Сценарий» для оценки состояния русла реки Бурей после схода скальных пород // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 76. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
4. Бондур В. Г., Захарова Л. Н., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. (2019а). Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Бурей по данным интерферометрической съёмки радаров L-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 113–119. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119.
5. Бондур В. Г., Захарова Л. Н., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. (2019б). Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров L-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурей // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14.
6. Бондур В. Г., Захарова Л. Н., Захаров А. И. (2019в). Мониторинг состояния оползневой зоны на реке Бурей в 2018–2019 годах по радиолокационным и оптическим космическим изображениям // Исслед. Земли из космоса 2019. № 6. С. 26–35. DOI: 10.31857/S0205-96142019626-35.
7. Викторов А. С., Георгиевский Б. В., Капралова В. Н., Орлов Т. В., Трапезникова О. Н., Зверев А. В. Опыт дистанционного мониторинга опасных геологических процессов по трассе трубопроводных систем (Восточная Сибирь) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 6. С. 50–58. DOI: 10.1134/S0869780318050095.

8. Временные требования к использованию материалов дистанционного зондирования Земли при ведении мониторинга экзогенных геологических процессов в составе государственного мониторинга состояния недр / сост. Зеркаль О. В., Мирнова А. В., Азаркина Н. Н., Воевода В. М., Евдокимов С. В. М.: Геоинформмарк, 2000. 52 с.
9. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Красногорский М. Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92. DOI: 10.7868/S0205961418030065.
10. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурей по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
11. Зеркаль О. В., Махинов А. Н., Кудымов А. В., Харитонов М. Е., Фоменко И. К., Барыкина О. С. Буреинский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // Геориск. 2019. Т. 13. № 4. С. 18–30. DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-30.
12. Инженерно-геологические изыскания для строительства. СП 11-105-97. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2003. 93 с.
13. Караев Ю. И. К вопросу применения дистанционных методов исследований при изучении природных опасностей и рисков // Грозненский естественнонауч. бюл. 2017. № 3(7). С. 42–47.
14. Крамарева Л. С., Луян Е. А., Амелченко Ю. А., Буцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурей 11 декабря 2018 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-266-271.
15. Крамарева Л. С., Луян Е. А., Амелченко Ю. А., Буцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Бородинская А. В. (2019а). Наблюдение за ходом взрывных работ и устройством прорана в зоне схода скальных пород на реке Бурей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 259–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-259-265.
16. Крамарева Л. С., Луян Е. А., Амелченко Ю. А., Беляев М. Ю., Буцев М. А., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Есаков А. М. (2019б). Наблюдение за динамикой прорана, устроенного в зоне схода скальных пород на реке Бурей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 278–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-278-283.
17. Луян Е. А., Прошин А. А., Буцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
18. Меньшиков С. Н., Мельников И. В., Осокин А. Б., Смолов Г. К., Беленов А. В., Абрисимов А. В., Сизов О. С. Мониторинг опасных экзогенных процессов на месторождениях п-ова Ямал с использованием результатов космической съёмки // Газовая промышленность. 2016. № 7–8. С. 126–132.
19. Методические рекомендации по организации и ведению государственного мониторинга экзогенных геологических процессов / сост. Шеко А. И., Круподеров В. С., Дьяконова В. И., Круглова Л. В., Мальнева И. В., Парфенов С. И., Постоев Г. П. М.: ВСЕГИНГЕО, 1997. 39 с.
20. Остроухов А. В., Ким В. И., Махинов А. Н. Оценка морфометрических параметров оползня на Бурейском водохранилище и его последствий на основе ДДЗЗ и данных полевых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 254–258. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-254-258.
21. Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Дмитриев П. Н., Михайлов В. О. О возможности применения РСА-интерферометрии с использованием снимков со спутников Sentinel-1 при изучении оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111.
22. Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Михайлов В. О. Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 147–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
23. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Возможности применения РСА-интерферометрии серий разночастотных спутниковых радарных снимков с различной геометрией съёмки для изучения и мониторинга оползневой активности в районе Большого Сочи (на примере окрестностей Адлера 2007–2019 гг.) // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 98. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
24. *Солонько Е. В., Хлебникова Е. П.* Использование разновременных космических снимков для оценки развития оползневых процессов на территории города Барнаула // Материалы международной науч. конф. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016 «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Новосибирск: СГГА, 2016. Т. 1. С. 59–63.
  25. *Abancó C., Bennett G., Briant J., Battiston S.* Towards an automatic landslide mapping tool based on satellite imagery and geomorphological parameters. A study of the Itogon area (Philippines) after Typhoon Mangkhut // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 7940. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-17940.
  26. *Ahmed B., Dewan A.* Application of Bivariate and Multivariate Statistical Techniques in Landslide Susceptibility Modeling in Chittagong City Corporation, Bangladesh // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 304. DOI: 10.3390/rs9090304.
  27. *Barra A., Reyes-Carmona C., Monserrat O., Glave J. P., Herrera G., Mateos R. M., Sarro R., Bejar M., Azañón J. M., Crosetto M.* Sentinel-1 for Granada coast landslides monitoring and potential damage assessment // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 19236. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19236.
  28. *Behling R., Roessner S.* Spatiotemporal Landslide Mapper for Large Areas Using Optical Satellite Time Series Data // Proc. 4<sup>th</sup> World Landslide Forum (WLF). Ljubljana, Slovenia, 2017. Springer Intern. Publishing AG, 2017. P. 143–152. DOI: 10.1007/978-3-319-53498-5\_17.
  29. *Bickel V. T., Manconi A., Amann F.* Quantitative Assessment of Digital Image Correlation Methods to Detect and Monitor Surface Displacements of Large Slope Instabilities // Remote Sensing. 2018. V. 10. Art. No. 865. DOI: 10.3390/rs10060865.
  30. *Bivic R. L., Allemand P., Quiquerez A., Delacourt C.* Potential and limitation of SPOT-5 Ortho-image correlation to investigate the Cinematics of landslides: The example of “Mare à Poule d’Eau” (Réunion, France) // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 106. DOI: 10.3390/rs9090106.
  31. *Bliss C., Wainwright J., Donoghue D., Jordan C.* Estimating soil moisture from COSMO-SkyMed data at an active landslide site in North Yorkshire, UK // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 22063. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-22063.
  32. *Bozzano F., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., Pari P., Discenza M.* Basin Scale Assessment of Landslides Geomorphological Setting by Advanced InSAR Analysis // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 267. DOI: 10.3390/rs9090267.
  33. *Catani F.* Landslide recognition by deep learning of non-standard multi-source images // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 19477. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19477.
  34. *Comert R., Avdan U., Gorum T., Nefeslioglu H. A.* Mapping of shallow landslides with object-based image analysis from unmanned aerial vehicle data // Engineering Geology. 2019. V. 260. Art. No. 105264. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.05264.
  35. *Cuervas-Mons J., Monserrat O., Domínguez-Cuesta M. J., Mateos-Redondo F., González-Pumariega P., López-Fernández C., Valenzuela P., Barra A., Pascual-Lombardía P., Jiménez-Sánchez M.* DInSAR and topographic techniques applied to study the Tazones Lighthouse landslide (N Spain) // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 10455. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10455, 2020.
  36. *Deijns A. J., Bevington A. R., Van Zadelhoff F., De Jong S. M., Geertsema M., McDougall S.* Semi-automated detection of landslide timing using harmonic modelling of satellite imagery, Buckingham River, Canada // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. V. 84. Art. No. 101943. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101943.
  37. *Devoto S., Macovaz V., Mantovani M., Soldati M., Furlani S.* Advantages of Using UAV Digital Photogrammetry in the Study of Slow-Moving Coastal Landslides // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 3566. DOI: 10.3390/rs12213566.
  38. *Di Napoli M., Marsiglia P., Di Martire D., Ramondini M., Ullo S. L., Calcaterra D.* Landslide susceptibility assessment of wildfire burnt areas through earth-observation techniques and a machine learning-based approach // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2505. DOI: 10.3390/rs12212505.
  39. *Fang Z., Wang Y., Duan G., Peng L.* Landslide Susceptibility Mapping Using Rotation Forest Ensemble Technique with Different Decision Trees in the Three Gorges Reservoir Area, China // Remote Sensing. 2021. V. 13(2). Art. No. 238. DOI: 10.3390/rs13020238.
  40. *Frodella W., Gigli G., Morelli S., Lombardi L., Casagli N.* Landslide Mapping and Characterization through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach from Some Case Studies // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 1281. DOI: 10.3390/rs9091281.
  41. *Golovko D., Roessner S., Behling R., Wetzels H-U., Kleinschmit B.* Evaluation of remote-sensing-based landslide inventories for hazard assessment in southern Kyrgyzstan // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 943. DOI: 10.3390/rs9090943.
  42. *Hastaoglu K. O., Gül Y. H., Poyraz F., Kara B. C.* Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 83. Art. No. 101916. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101916.

43. *Hermle D., Keuschnig M., Krautblatter M.* Potential of multisensor assessment using digital image correlation for landslide detection and monitoring // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 16982. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-16982, 2020.
44. *Intrieri E., Frodella W., Raspini F., Bardi F., Tofani F.* Using Satellite Interferometry to Infer Landslide Sliding Surface Depth and Geometry // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 1462. DOI: 10.3390/rs12091462.
45. *Jongmans D., Fiolleau S., Bièvre G., Chambon G., Lacroix P.* Combination of high frequency (Sentinel-2) and high resolution (Pléiades) satellite images for the monitoring of clayey landslide reactivations, application to the Harmalière landslide (French Alps) // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 9368. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-9368, 2020.
46. *Khan H., Shafique M., Khan M., Bacha M., Shah S. U., Calligaris C.* Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, a case study of northern Pakistan // Egyptian J. Remote Sensing and Space Sciences. 2019. V. 22. P. 11–24. DOI: 10.1016/j.ejrs.2018.03.004.
47. *Kirschbaum D., Stanley T.* Satellite based assessment of rainfall-triggered landslide hazard for situational awareness // Earth's Future. 2018. V. 6. P. 505–523. DOI: 10.1002/2017EF00071.
48. *Konishi T., Suga Y.* Landslide detection using COSMO-SkyMed images: A case study of a landslide event on Kii peninsula, Japan // European J. Remote Sensing. 2018. V. 51. No. 1. P. 205–221. DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185.
49. *Lacroix P., Bièvre G., Pathier E., Knies U., Jongmans D.* Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide failures // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 215. P. 507–516. DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.042.
50. *Lee D. H., Kim Y. T., Lee S. R.* Shallow Landslide Susceptibility Models Based on Artificial Neural Networks Considering the Factor Selection Method and Various Non-Linear Activation Functions // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 1194. DOI: 10.3390/rs12071194.
51. *Li W., Fan X., Huang F., Chen W., Hong H., Huang J., Guo Z.* Uncertainties Analysis of Collapse Susceptibility Prediction Based on Remote Sensing and GIS: Influences of Different Data-Based Models and Connections between Collapses and Environmental Factors // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 4134. DOI: 10.3390/rs12244134.
52. *Melis M. T., Da Pelo S., Erbi I., Loche M., Deiana G., Demurtas V., Meloni M. A., Dessì F., Funedda A., Scaioni M., Scaringi G.* Thermal Remote Sensing from UAVs: A Review on Methods in Coastal Cliffs Prone to Landslides // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 1971. DOI: 10.3390/rs12121971.
53. *Motagh M., Roessner S., Akbari B., Behling R., Stefanova-Vassileva M., Haghshenas-Haghighi M., Ulrich-Wetzel H.* Landslides triggered by 2019 extreme rainfall and flood events in Iran: Results from satellite remote sensing and field survey // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 10715. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10715.
54. *Pappalardo G., Mineo S., Angrisani A. C., Di Martire D., Calcaterra D.* Combining field data with infrared thermography and DInSAR surveys to evaluate the activity of landslides: The case study of Randazzo Landslide (NE Sicily) // Landslides. 2018. V. 15. P. 2173–2193. DOI: 10.1007/s10346-018-1026-9.
55. *Park H. J., Jang J. Y., Lee J. H.* Physically Based Susceptibility Assessment of Rainfall-Induced Shallow Landslides Using a Fuzzy Point Estimate Method // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 487. DOI: 10.3390/rs9090487.
56. *Piroton V., Schlögel R., Havenith H. B.* Monitoring recent activity of the Koytash Landslide (Kyrgyzstan) using radar and optical remote sensing techniques // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 20180. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20180.
57. *Prakash N., Manconi A., Loew S.* Mapping landslides from EO data using deep-learning methods // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 11876. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-11876.
58. *Rabby Y. W., Ishtiaque A., Rahman S.* Evaluating the Effects of Digital Elevation Models in Landslide Susceptibility Mapping in Rangamati District, Bangladesh // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2718. DOI: 10.3390/rs12172718.
59. *Ray R. L., Lazzari M., Olutimehin T.* Remote Sensing Approaches and Related Techniques to Map and Study Landslides // Landslides — Investigation and Monitoring. IntechOpen, 2020. 24 p. DOI: 10.5772/intechopen.93681.
60. *Reyes-Carmona C., Galve J. P., Barra A., Monserrat O., Mateos R. M., Azañón J. M., Pérez-Peña J. V., Ruano P.* The Sentinel-1 CNR-IREA SBAS service of the European Space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP) as a powerful tool for landslide activity detection and monitoring // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 19410. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19410.
61. *Roessner S., Behling R., Motagh M., Ulrich-Wetzel H.* Multi-scale analysis of landslide occurrence and evolution using optical and radar time series // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 20702. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20702.
62. *Rosi A., Tofani V., Tanteri L., Tacconi Stefanelli C., Agostini A., Catani F., Casagli N.* The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution // Landslides. 2018. V. 15. P. 5–19. DOI: 10.1007/s10346-017-0861-4.

63. Roy J., Saha S., Arabameri A., Blaschke T., Bui D., Tien A. Novel Ensemble Approach for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Darjeeling and Kalimpong Districts, West Bengal, India // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Art. No. 2866. DOI: 10.3390/rs11232866.
64. Schiller A., Vecchiotti F., Amabile A. S., Guardiani C., Dhital M. R., Dhakal A., Pant B. R., Ostermann M., Supper R. Ground motion and PSI density analysis from Envisat and Sentinel 1A InSAR data in the context of a complex landslide monitoring strategy in Karnali river basin, Far-Western Nepal // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 21875. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-21875.
65. Shahzad N., Ding X., Abbas S. Prediction ability of machine learning algorithms in Himalaya region of Pakistan for landslide susceptibility mapping // 22<sup>nd</sup> EGU General Assembly. 4–8 May, 2020. id. 6757. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-6757.
66. Solari L., Bianchini S., Franceschini R., Barra A., Monserrat O., Thuegaz P., Bertolo D., Crosetto M., Catani F. Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 87. Art. No. 102028. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102028.
67. Sun W., Tian Y., Mu X., Zhai J., Gao P., Zhao G. Loess landslide inventory map based on GF-1 satellite imagery // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Art. No. 314. DOI: 10.3390/rs9040314.
68. Wang Q., Wang Y., Niu R., Peng L. Integration of information theory, K-means cluster analysis and the logistic regression model for landslide susceptibility mapping in the three gorges area, China // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Art. No. 938. DOI: 10.3390/rs9090938.
69. Ye C., Li Y., Cui P., Li L., Pirasteh S., Marcato J., Goncalves W. N., Li J. Landslide detection of hyperspectral remote sensing data based on deep learning with constraints // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019. V. 12. No. 12. P. 5047–5060. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2951725.
70. Zhang P., Xu C., Ma S., Shao X., Tian Y., Wen B. Automatic Extraction of Seismic Landslides in Large Areas with Complex Environments Based on Deep Learning: An Example of the 2018 Ibaraki Earthquake, Japan // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(23). Art. No. 3992. DOI: 10.3390/rs12233992.
71. Zhao F., Mallorqui J. J., Iglesias R., Gili J. A., Corominas J. Landslide monitoring using multi-temporal SAR interferometry with advanced persistent scatterers identification methods and super high-spatial resolution TerraSAR-X images // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Art. No. 921. DOI: 10.3390/rs10060921.

## **The state of the art and prospects of remote sensing data application in the study of exogenous geological processes by the example of landslides**

**I. O. Smirnova, A. A. Kirsanov**

*A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg 199106, Russia  
E-mail: sio\_iv@mail.ru*

Due to the active improvement of the technology for receiving and processing remote sensing data, the areas of practical application of remote methods have significantly expanded for studying and monitoring natural disasters caused by exogenous geological processes. Among these processes landslides are widespread and lead to loss of life and significant damage. The paper provides an overview and comparative assessment of the latest foreign and Russian landslide studies conducted using various remote sensing data (multispectral, thermal, radar, lidar, obtained from satellite, manned and unmanned aerial vehicle) and their advanced processing techniques for the detection, inventory, mapping of landslides, developing of landslide susceptibility maps, landslide hazard analysis, as well as landslide monitoring at a range of scales. The factors that cause landslides are analyzed. It is noted that the analysis of remote sensing data should be carried out on the basis of GIS in combination with landscape, topographic, geological, geophysical and field data, as well as on the basis of mathematical models created using statistical methods, including machine learning methods. The state of the art and prospects of remote sensing methods in landslide studies are characterized.

**Keywords:** remote sensing data, landslides, exogenous geological processes, monitoring, processing techniques

Accepted: 31.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-26-48

## References

1. Bezgodova O. V., Rasputina E. A., GIS-based automated mapping hazardous exogenous processes in the Tunka depression, *Geodeziya i kartografiya*, 2020, No. 3, pp. 8–20 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2020-957-3-8-20.
2. Bezgodova O. V., Istomina E. A., Ovchinnikova E. V., Assessment of hazardous exogenous processes of the Mondy depression based on morphometric and landscape analysis, *Geodeziya i kartografiya*, 2018, Vol. 79, No. 8, pp. 28–37 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2018-938-8-28-37.
3. Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Burtsev M. A., Balashov I. V., Esakov A. M., Tolpin V. A., Using data from the “Scenario” space experiment to assess the state of the Bureya Riverbed after the collapse of rocks, *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 17<sup>th</sup> Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 76 (in Russian), DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
4. Bondur V. G., Zakharova L. N., Zakharov A. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N. (2019a), Long-term monitoring of landslide process on the Bureya riverbank according to interferometric L-band radar data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 113–119 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119.
5. Bondur V. G., Zakharova L. N., Zakharov A. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N. (2019b), Monitoring of Landslide Processes by Means of L-Band Radar Interferometric Observations: Bureya River Bank Caving Case, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 5, pp. 3–14 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14.
6. Bondur V. G., Zakharova L. N., Zakharov A. I. (2019c), Monitoring of the Landslide Area State on Bureya River in 2018–2019 According to Radar and Optical Satellite Images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 6, pp. 26–35 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205-96142019626-35.
7. Viktorov A. S., Georgievskii B. V., Kapralova V. N., Orlov T. V., Trapeznikova O. N., Zverev A. V., The case study of remote sensing monitoring for geological hazards along pipeline systems (Eastern Siberia), *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2018, No. 6, pp. 50–58 (in Russian), DOI: 10.1134/S0869780318050095.
8. *Temporary requirements for the use of remote sensing data for monitoring exogenous geological processes as part of the state monitoring of the subsurface*, Zerkal O. V., Mirnova A. V., Azarkina N. N., Voevoda V. M., Evdokimov S. V. (eds.), Moscow: Geoinformmark, 2000, 52 p. (in Russian).
9. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorsky M. G., Monitoring of the landslide activity using radar interferometric observations of trihedral corner reflectors, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 80–92 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030065.
10. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
11. Zerkal O. V., Makhinov A. N., Kudymov A. V., Kharitonov M. E., Fomenko I. K., Barykina O. S., Bureya landslide on 11 December 2018. Bureya landslide on 11 December 2018. Conditions of the formation and features of the development mechanism, *GeoRisk World*, 2019, Vol. 13, No. 4, pp. 18–30 (in Russian), DOI: 10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-30.
12. *Engineering and geological surveys for construction. SP 11-105-97. Part II. Rules for the production of works in areas of development of dangerous geological and engineering-geological processes*, Moscow: Gosstroj Rossii, 2003, 93 p. (in Russian).
13. Karaev Yu. I., Application of remote sensing in the study of natural hazards and risks, *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten’*, 2017, No. 3(7), pp. 42–47 (in Russian).
14. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krashennnikova Yu. S., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Observation of the hill collapse zone near the Bureya River on December 11, 2018, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 266–271 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-266-271.
15. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krashennnikova Yu. S., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Boroditskaya A. V. (2019a), Observing the progress of blasting operations

- and channeling in the area of the rock slide on the Bureya River, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 259–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-259-265.
16. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Belyaev M. Yu., Burtsev M. A., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Esakov A. M. (2019b), Dynamics of the channel on the Bureya River in the hill slope collapse area, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 278–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-278-283.
  17. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
  18. Menshikov S. N., Melnikov I. V., Osokin A. B., Smolov G. K., Belenov A. V., Abrosimov A. V., Sizov O. S., Satellite observations help monitor hazardous exogenic processes across Yamal Peninsula fields, *Gazovaya promyshlennost'*, 2016, No. 7–8, pp. 126–132 (in Russian).
  19. *Methodological recommendations for the organization and management of state monitoring of exogenous geological processes*, Sheko A. I., Krupoderov V. S., Dyakonova V. I., Kruglova L. V., Malneva I. V., Parfenov S. I., Postoev G. P. (eds.), Moscow: VSEGINGEO, 1997, 39 p. (in Russian).
  20. Ostroukhov A. V., Kim V. I., Makhinov A. N., Estimation of the morphometric parameters of the landslide on the Bureinskoe Reservoir and its consequences on the basis of remote sensing data and field measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 254–258 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-254-258.
  21. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Dmitriev P. N., Mikhailov V. O., On the possibility of using Sentinel-1 SAR interferometry to study landslide activity in the mountain cluster of the Big Sochi area, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 103–111 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111.
  22. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Sentinel-1 InSAR for investigation of active deformation areas: case study of the coastal region of the Big Sochi, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
  23. Smolianinova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., Possibilities of using SAR interferometry of a series of different-frequency satellite radar images with different survey geometries for the study and monitoring of landslide activity in the Big Sochi area (by example of Adler neighborhoods in 2007–2019), *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAN, 2020, p. 98 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
  24. Solonko E. V., Khlebnikova E. P., Using multi-temporal satellite images to assess the development of landslide processes in the city of Barnaul, *Distantsionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchei sredy, geoekologiya* (Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology: Proc. Intern. Scientific Conf. Interexpo GEO-Siberia-2016), Novosibirsk: SGGa, 2016, Vol. 1, pp. 59–63 (in Russian).
  25. Abancó C., Bennett G., Briant J., Battiston S., Towards an automatic landslide mapping tool based on satellite imagery and geomorphological parameters. A study of the Itogon area (Philippines) after Typhoon Mangkhut, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 17940, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-17940.
  26. Ahmed B., Dewan A., Application of Bivariate and Multivariate Statistical Techniques in Landslide Susceptibility Modeling in Chittagong City Corporation, Bangladesh, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 304, DOI: 10.3390/rs9090304.
  27. Barra A., Reyes-Carmona C., Monserrat O., Glave J. P., Herrera G., Mateos R. M., Sarro R., Bejar M., Azañón J. M., Crosetto M., Sentinel-1 for Granada coast landslides monitoring and potential damage assessment, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May 2020, id. 19236, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19236.
  28. Behling R., Roessner S., Spatiotemporal Landslide Mapper for Large Areas Using Optical Satellite Time Series Data, *Proc. 4<sup>th</sup> World Landslide Forum (WLF)*, Ljubljana, Slovenia, 2017, Springer Intern. Publishing AG, 2017, pp. 143–152, DOI: 10.1007/978-3-319-53498-5\_17.
  29. Bickel V. T., Manconi A., Amann F., Quantitative Assessment of Digital Image Correlation Methods to Detect and Monitor Surface Displacements of Large Slope Instabilities, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Art. No. 865, DOI: 10.3390/rs10060865.
  30. Bivic R. L., Allemand P., Quiquerez A., Delacourt C., Potential and limitation of SPOT-5 Ortho-image correlation to investigate the Cinematics of landslides: The example of "Mare à Poule d'Eau" (Réunion, France), *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 106, DOI: 10.3390/rs9090106.

31. Bliss C., Wainwright J., Donoghue D., Jordan C., Estimating soil moisture from COSMO-SkyMed data at an active landslide site in North Yorkshire, UK, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 22063, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-22063.
32. Bozzano F., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., Pari P., Discenza M., Basin Scale Assessment of Landslides Geomorphological Setting by Advanced InSAR Analysis, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 267, DOI: 10.3390/rs9090267.
33. Catani F., Landslide recognition by deep learning of non-standard multi-source images, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 19477, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19477.
34. Comert R., Avdan U., Gorum T., Nefeslioglu H. A., Mapping of shallow landslides with object-based image analysis from unmanned aerial vehicle data, *Engineering Geology*, 2019, Vol. 260, Art. No. 105264, DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105264.
35. Cuervas-Mons J., Monserrat O., Domínguez-Cuesta M. J., Mateos-Redondo F., González-Pumariega P., López-Fernández C., Valenzuela P., Barra A., Pascual-Lombardía P., Jiménez-Sánchez M., DInSAR and topographic techniques applied to study the Tazones Lighthouse landslide (N Spain), *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 10455, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10455.
36. Deijns A. J., Bevington A. R., Van Zadelhoff F., De Jong S. M., Geertsema M., McDougall S., Semi-automated detection of landslide timing using harmonic modelling of satellite imagery, Buckingham River, Canada, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, Vol. 84, Art. No. 101943, DOI: 10.1016/j.jag.2019.101943.
37. Devoto S., Macovaz V., Mantovani M., Soldati M., Furlani S., Advantages of Using UAV Digital Photogrammetry in the Study of Slow-Moving Coastal Landslides, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 3566, DOI: 10.3390/rs12213566.
38. Di Napoli M., Marsiglia P., Di Martire D., Ramondini M., Ullo S. L., Calcaterra D., Landslide susceptibility assessment of wildfire burnt areas through earth-observation techniques and a machine learning-based approach, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2505, DOI: 10.3390/rs12212505.
39. Fang Z., Wang Y., Duan G., Peng L., Landslide Susceptibility Mapping Using Rotation Forest Ensemble Technique with Different Decision Trees in the Three Gorges Reservoir Area, China, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(2), Art. No. 238, DOI: 10.3390/rs13020238.
40. Frodella W., Gigli G., Morelli S., Lombardi L., Casagli N., Landslide Mapping and Characterization through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach from Some Case Studies, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 1281, DOI: 10.3390/rs9091281.
41. Golovko D., Roessner S., Behling R., Wetzel H-U., Kleinschmit B., Evaluation of remote-sensing-based landslide inventories for hazard assessment in southern Kyrgyzstan, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 943, DOI: 10.3390/rs9090943.
42. Hastaoglu K. O., Gül Y. H., Poyraz F., Kara B. C., Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 83, Art. No. 101916, DOI: 10.1016/j.jag.2019.101916.
43. Hermle D., Keuschnig M., Krautblatter M., Potential of multisensor assessment using digital image correlation for landslide detection and monitoring, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 16982, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-16982, 2020.
44. Intrieri E., Frodella W., Raspini F., Bardi F., Tofani F., Using Satellite Interferometry to Infer Landslide Sliding Surface Depth and Geometry, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 1462, DOI: 10.3390/rs12091462.
45. Jongmans D., Fiolleau S., Bièvre G., Chambon G., Lacroix P., Combination of high frequency (Sentinel-2) and high resolution (Pléiades) satellite images for the monitoring of clayey landslide reactivations, application to the Harmalière landslide (French Alps), *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 9368, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-9368.
46. Khan H., Shafique M., Khan M., Bacha M., Shah S. U., Calligaris C., Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, a case study of northern Pakistan, *Egyptian J. Remote Sensing and Space Sciences*, 2019, Vol. 22, pp. 11–24, DOI: 10.1016/j.ejrs.2018.03.004.
47. Kirschbaum D., Stanley T., Satellite based assessment of rainfall-triggered landslide hazard for situational awareness, *Earth's Future*, 2018, Vol. 6, pp. 505–523, DOI: 10.1002/2017EF00071.
48. Konishi T., Suga Y., Landslide detection using COSMO-SkyMed images: A case study of a landslide event on Kii peninsula, Japan, *European J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 51, No. 1, pp. 205–221, DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185.
49. Lacroix P., Bièvre G., Pathier E., Knies U., Jongmans D., Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide failures, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 215, pp. 507–516, DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.042.
50. Lee D. H., Kim Y. T., Lee S. R., Shallow Landslide Susceptibility Models Based on Artificial Neural Networks Considering the Factor Selection Method and Various Non-Linear Activation Functions, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 1194, DOI: 10.3390/rs12071194.

51. Li W., Fan X., Huang F., Chen W., Hong H., Huang J., Guo Z., Uncertainties Analysis of Collapse Susceptibility Prediction Based on Remote Sensing and GIS: Influences of Different Data-Based Models and Connections between Collapses and Environmental Factors, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 4134, DOI: 10.3390/rs12244134.
52. Melis M. T., Da Pelo S., Erbi I., Loche M., Deiana G., Demurtas V., Meloni M. A., Dessì F., Funedda A., Scaioni M., Scaringi G., Thermal Remote Sensing from UAVs: A Review on Methods in Coastal Cliffs Prone to Landslides, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 1971, DOI: 10.3390/rs12121971.
53. Motagh M., Roessner S., Akbari B., Behling R., Stefanova-Vassileva M., Haghshenas-Haghighi M., Ulrich-Wetzel H., Landslides triggered by 2019 extreme rainfall and flood events in Iran: Results from satellite remote sensing and field survey, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 10715, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10715.
54. Pappalardo G., Mineo S., Angrisani A. C., Di Martire D., Calcaterra D., Combining field data with infrared thermography and DInSAR surveys to evaluate the activity of landslides: The case study of Randazzo Landslide (NE Sicily), *Landslides*, 2018, Vol. 15, pp. 2173–2193, DOI: 10.1007/s10346-018-1026-9.
55. Park H. J., Jang J. Y., Lee J. H., Physically Based Susceptibility Assessment of Rainfall-Induced Shallow Landslides Using a Fuzzy Point Estimate Method, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 487, DOI: 10.3390/rs9090487.
56. Piroton V., Schlögel R., Havenith H. B., Monitoring recent activity of the Koytash Landslide (Kyrgyzstan) using radar and optical remote sensing techniques, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 20180, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20180.
57. Prakash N., Manconi A., Loew S., Mapping landslides from EO data using deep-learning methods, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 11876, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-11876.
58. Rabby Y. W., Ishtiaque A., Rahman S., Evaluating the Effects of Digital Elevation Models in Landslide Susceptibility Mapping in Rangamati District, Bangladesh, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2718, DOI: 10.3390/rs12172718.
59. Ray R. L., Lazzari M., Olutimehin T., Remote Sensing Approaches and Related Techniques to Map and Study Landslides, In: *Landslides — Investigation and Monitoring*, IntechOpen, 2020, DOI: 10.5772/intechopen.93681.
60. Reyes-Carmona C., Galve J. P., Barra A., Monserrat O., Mateos R. M., Azañón J. M., Pérez-Peña J. V., Ruano P., The Sentinel-1 CNR-IREA SBAS service of the European Space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP) as a powerful tool for landslide activity detection and monitoring, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 19410, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-19410.
61. Roessner S., Behling R., Motagh M., Ulrich-Wetzel H., Multi-scale analysis of landslide occurrence and evolution using optical and radar time series, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 20702, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-20702.
62. Rosi A., Tofani V., Tanteri L., Tacconi Stefanelli C., Agostini A., Catani F., Casagli N., The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution, *Landslides*, 2018, Vol. 15, pp. 5–19, DOI: 10.1007/s10346-017-0861-4.
63. Roy J., Saha S., Arabameri A., Blaschke T., Bui D., Tien A., Novel Ensemble Approach for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Darjeeling and Kalimpong Districts, West Bengal, India, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Art. No. 2866, DOI: 10.3390/rs11232866.
64. Schiller A., Vecchiotti F., Amabile A. S., Guardiani C., Dhital M. R., Dhakal A., Pant B. R., Ostermann M., Supper R., Ground motion and PSI density analysis from Envisat and Sentinel 1A InSAR data in the context of a complex landslide monitoring strategy in Karnali river basin, Far-Western Nepal, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 21875, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-21875.
65. Shahzad N., Ding X., Abbas S., Prediction ability of machine learning algorithms in Himalaya region of Pakistan for landslide susceptibility mapping, *22<sup>nd</sup> EGU General Assembly*, 4–8 May, 2020, id. 6757, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-6757.
66. Solari L., Bianchini S., Franceschini R., Barra A., Monserrat O., Thuegaz P., Bertolo D., Crosetto M., Catani F., Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, Vol. 87, Art. No. 102028, DOI: 10.1016/j.jag.2019.102028.
67. Sun W., Tian Y., Mu X., Zhai J., Gao P., Zhao G., Loess landslide inventory map based on GF-1 satellite imagery, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 314, DOI: 10.3390/rs9040314.
68. Wang Q., Wang Y., Niu R., Peng L., Integration of information theory, K-means cluster analysis and the logistic regression model for landslide susceptibility mapping in the three gorges area, China, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Art. No. 938, DOI: 10.3390/rs9090938.
69. Ye C., Li Y., Cui P., Li L., Pirasteh S., Marcato J., Goncalves W. N., Li J., Landslide detection of hyperspectral remote sensing data based on deep learning with constrains, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, Vol. 12, No. 12, pp. 5047–5060, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2951725.

70. Zhang P., Xu C., Ma S., Shao X., Tian Y., Wen B., Automatic Extraction of Seismic Landslides in Large Areas with Complex Environments Based on Deep Learning: An Example of the 2018 Iburi Earthquake, Japan, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(23), Art. No. 3992, DOI: 10.3390/rs12233992.
71. Zhao F., Mallorqui J.J., Iglesias R., Gili J.A., Corominas J., Landslide monitoring using multi-temporal SAR interferometry with advanced persistent scatters identification methods and super high-spatial resolution TerraSAR-X images, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Art. No. 921, DOI: 10.3390/rs10060921.