Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2024, Том 16, № 6 / 2024, Vol. 16, Iss. 6 https://esj.today/issue-6-2024.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/23NZVN624.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Тодорова, А. Й. Применение космической радиолокационной съемки для выявления вызванных карстовыми процессами чрезвычайных ситуаций на железнодорожных путях в Нижегородской области / А. Й. Тодорова // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 6. — URL: https://esj.today/PDF/23NZVN624.pdf

For citation:
Todorova A.Y. Application of space-based radar imaging for detection of emergency situations caused by karst on railways of Nizhny Novgorod region. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6): 23NZVN624. Available at: https://esj.today/PDF/23NZVN624.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 528.88:551.435

Тодорова Ася Йорданова
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Преподаватель
E-mail: assia.genova@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1061781

Применение космической радиолокационной съемки для выявления вызванных карстовыми процессами чрезвычайных ситуаций на железнодорожных путях в Нижегородской области

Аннотация. В статье рассмотрена проблема мониторинга и оперативного обнаружения аварийных ситуаций, обусловленных в первую очередь карстовыми явлениями, на железнодорожных путях в Нижегородской области. Представлена краткая информация о вызванных карстовыми явлениями авариях и рассмотрены используемые в настоящее время методы мониторинга — преимущественно контактные, а также использование оптической съемки с беспилотных летательных аппаратов и космических снимков оптического диапазона. Автором предлагается использование данных космической радиолокационной съемки для обнаружения аномалий на железнодорожных путях, для чего предлагается использовать интерферометрическую обработку пар радиолокационных снимков, но вместо карты смещений, которая с учетом характера местности и климата Нижегородской области оказывается в значительной степени бесполезной, предлагается использовать карту когерентности интерферограммы. Проведен подробный анализ данных радиолокационной съемки района аварии на перегоне Арзамас — Пешелань в 2020 году, полученных со спутника Sentinel-1 Европейского космического агентства и находящихся в открытом доступе; показан характерный вид карт когерентности интерферограмм и локальные особенности, проявляющиеся на картах когерентности, но не на снимках оптического диапазона. Продемонстрирована возможность использования радиолокационных данных совместно с другими данными дистанционного зондирования Земли и картографическими данными для мониторинга аварийных ситуаций. В связи с формированием отечественной группировки радиолокационных спутников «Кондор-ФКА», данные с которых должны быть пригодны для формирования интерферограмм, предлагается использовать их в качестве дополнительной информации для дистанционного мониторинга состояния железнодорожного полотна.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; космическая съемка; радиолокация; карст; железная дорога; чрезвычайная ситуация; радиолокационная интерферометрия

Введение

Из 31,5 % площади суши Земного шара 9,5 % составляют районы открытого карста, а 22 % — районы покрытого карста, где растворимые породы перекрыты нерастворимыми грунтами [1]. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций на территориях, подверженных разрушительным процессам в покрытом карсте, представляют сложную задачу, удовлетворительное решение которой на текущий момент не найдено, о чем свидетельствуют продолжающиеся аварийные ситуации в закарстованных районах. В 2011 году в Нижегородской области карстовым и карстово-суффозионным процессам были подвержены территории общей площадью 19 994 км², что составляет 26 % всей территории области[1], при этом растворимые отложения могут быть перекрыты пластами грунтов толщиной 50–70 м [1], что еще больше затрудняет своевременное выявление протекающих разрушительных процессов. Такой характер строения местности, как рассмотрено в работе [2], приводит к смешанному — карстово-суффозионно-обвальному механизму провалообразования. При этом аварийных ситуации вызываются не только образованием провалов, появлением или пропаданием водных объектов, но и более или менее глубокими проседаниями грунта. Тем не менее, даже образование относительно пологих проседаний в районе железнодорожных путей приводит к катастрофическим последствиям.

Карстово-суффозионные процессы в течение всего XX века приводили и в XXI веке продолжают приводить к авариям и аварийным ситуациям на Горьковской железной дороге, наиболее значительные из которых включают в себя[2]:

- в 1903 г. на 411 километре линии Москва — Нижний Новгород произошел сход вагонов;
- в 1943 г. на 395 километре линии Москва — Горький произошло крушение поезда;
- в 1960 г. на том же 395 километре линии Москва — Горький снова произошел сход вагонов;
- в 1994 г. карстовый провал на 226 км перегона Пешелань — Арзамас-1 вызвал крушение грузового поезда, в результате чего движение было закрыто более чем на сутки;
- в 1995 г. снова на 395 километре линии Москва — Нижний Новгород на несколько см опустился участок нечетного пути, что вызвало остановку движения поездов на 12 часов, после чего были проведены работы по укреплению полотна.
- в феврале 2007 года воронка диаметром 18 метров образовалась под трамвайными путями в 40 метрах от железной дороги на перегоне Дзержинск — Игумново, после чего руководство железной дороги установило в этом месте круглосуточный пост наблюдения;

[1] Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области в 2011 году. Доклад. — Минэкологии и природных ресурсов Нижегородской области, Нижний Новгород, 2012. — 319 с.

[2] Против коварства карста // Волжская магистраль. — 2009. — № 48. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=563240 (дата обращения: 03.11.2024).

- в декабре 2020 снова на 226 км перегона Пешелань — Арзамас-1 карстовая воронка вызвала сход с рельсов локомотива грузового состава (этот случай более подробно рассмотрен в данной статье далее).

Эти примеры показывают важность своевременного обнаружения скрытых карстовых процессов, приводящих к повреждениям железнодорожных путей.

В данной статье предлагается в качестве одного из методов оперативного обнаружения повреждений железнодорожных путей, характерных для карстовых процессов, использование карт когерентности, получаемых в процессе интерферометрической обработки пар радиолокационных космических снимков.

Существующие методические подходы

Исторически для выявления карстовых процессов, помимо визуального контроля, используется бурение скважин, позволяющее выявлять изменения слоев железнодорожной насыпи и ее основания.

В 2007 году в Нижегородской области начали использовать мощный георадар, работающий на низких частотах для увеличения глубины проникновения до ста метров в глубину.[3] Также используется[4] датчик смещения грунта на основе оптоволоконного кабеля, способного регистрировать малые деформации [3].

Одним из перспективных направлений является использование сейсмических методов [4], в том числе с использованием в качестве источника сигнала вибрации от проходящих составов [5]. Проводятся эксперименты по применению бесконтактных электромагнитных методов на основе измерения удельного электрического сопротивления слоев грунта [6]. Однако все перечисленные методы требуют установки и поддержания в рабочем состоянии оборудования по всей протяженности железной дороги или ручного труда работников. Для повышения эффективности мониторинга необходим переход к контролю с помощью данных дистанционного зондирования.

В настоящее время на железных дорогах Нижегородской области применяются дистанционные методы мониторинга состояния железнодорожного полотна, включающие использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, применяются специалистами инженерно-геологической базы Нижегородского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры (РЦДМ) с 2022 года для выполнения видеофиксации и построения цифровых моделей местности и ортофотопланов).[5]

Для более надежного определения деформацию устанавливаются геодезические марки, которые хорошо видны на полученных с БПЛА снимках и в перспективе на космических снимках высокого разрешения.[6]

Планируется создание аппаратно-программного комплекса прогнозирования и принятия решений на основе космического мониторинга, реализуемое совместно РЦДМ и университетом

---

[3] От карста лекарство // Волжская магистраль. — 2008. № 6. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=559234 (дата обращения: 03.11.2024).

[4] Контроль пустоты // Гудок. — 2012. — URL: https://gudok.ru/newspaper/?ID=678725 (дата обращения: 03.11.2024).

[5] Разведка дроном // Гудок. — 2024. — №19. — URL: https://gudok.ru/newspaper/?ID=1657649 (дата обращения: 03.11.2024).

[6] Наша марка, геодезическая // Волжская магистраль. — 2024. — № 31. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=1678146 (дата обращения: 03.11.2024).

Иннополис.[7] Этот комплекс позволит реализовать мониторинг на основе данных космической съемки с отечественных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), предоставляемых госкорпорацией «Роскосмос». В настоящее время специалисты РЦДМ используют открытые источники данных ДЗЗ для исследования местности.[8]

Для предотвращения аварий, участки путей, которые по результатам обследования или (в худшем случае) статистики аварийных ситуаций признаются опасными, реконструируются и усиливаются различными способами [7].

В мировой практике для обследования карстоопасных районов и выявления карстовых форм рельефа используются также радиолокационные методы, с применением локаторов воздушного или космического базирования. Если в первом случае выполнение съемки местности связано с большими финансовыми затратами, то во втором возможно использование спутниковых данных, находящихся в открытом доступе, в первую очередь со спутника Sentinel-1, рассмотренного далее в данной работе. В России также создается группировка радиолокационных спутников «Кондор-ФКА», данные которых бесплатны для целей борьбы с чрезвычайными ситуациями. В связи с этим, использование данных радиолокационной космической съемки для мониторинга карстовых процессов является перспективным направлением. Данные радиолокационной съемки, как правило, используются в комплексе с другими видами данных дистанционного зондирования.

Так, в работе [8] рассматривается совместное использование данных космической радиолокационной съемки Sentinel-1, космической оптической съемки Sentinel-2, различного рода статистических данных по исследуемой местности, а также данных GNSS-мониторинга для мониторинга и предсказания оползневых явлений с использованием машинного обучения. Несмотря на то, что рассмотренные в работе оползни напрямую не относятся к карстовым явлениям, это исследование описывает ценный опыт успешного применения комбинации различных типов данных ДЗЗ для мониторинга и предсказания опасных природных явлений. Одной из основных сложностей при таком подходе, как указано в работе, является необходимость подготовки большого массива обучающих данных для машинного обучения, т. е. требуется большой объем подготовительной работы, выполняемой с помощью других методов исследования.

Также возможно прогнозирование карстовых и суффозионных процессов на основе данных только радиолокационной съемки. Так, признаки образования будущего провала были обнаружены по результатам воздушной радиолокационной съемки, выполненной NASA в ходе мониторинга смещений земной поверхности в штате Луизиана.[9] При выполнении интерферометрической обработки данных, полученных в июне 2011 года и июле 2012 года, было выявлено смещение грунта в преимущественно горизонтальном направлении на 26 см. После этого 3 августа 2012 года на обследуемой территории возник провал площадью около 1 Га. Данный провал не является карстовым; он возник вследствие разрушения подземной солевой залежи из-за проводимых с нарушениями работ нефтяной компанией. Тем не менее, данное исследование демонстрирует перспективность использования радиолокационной съемки для мониторинга геоморфологических изменений.

---

[7] Космос на службе у железных дорог // Волжская магистраль. — 2024. — № 26. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=1675224 (дата обращения: 03.11.2024).

[8] Со спутника всё видно // Волжская магистраль. — 2024. — № 4. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=1656855 (дата обращения: 03.11.2024).

[9] Harrington J.D. NASA Radar Demonstrates Ability to Foresee Sinkholes / Harrington J.D., Buis A. // NASA News Release 14-064. 2014. — URL: https://www.nasa.gov/news-release/nasa-radar-demonstrates-ability-to-foresee-sinkholes/ (дата обращения: 03.11.2024).

Методика исследования

В настоящей работе рассматривается применение интерферометрической обработки снимков спутника Sentinel-1. Миссия Sentinel-1 представляет собой часть программы Copernicus Европейского космического агентства (ЕКА) по наблюдению за поверхностью Земли с помощью различных инструментов.[10] Каждый спутник Sentinel-1 оборудован радаром с синтезированной апертурой С-диапазона (несущая частота 5,405 ГГц, две поляризации на передачу и прием, разрешение на местности до 5 м). Изначально в рамках программы было запущено 2 спутника — Sentinel-1A в 2014 году и Sentinel-1B в 2016 году, с расчетным сроком службы 7 лет. В 2021 году на борту Sentinel-1B произошла авария, в результате чего в настоящее время по назначению функционирует только спутник Sentinel-1A. Еще два спутника, Sentinel-1C и Sentinel-1D, находятся на этапе подготовки к запуску. На момент написания данной статьи, аппарат Sentinel-1C планируется к запуску в декабре 2024 года.[11]

Один спутник проходит над одной точкой на поверхности Земли каждые 12 суток. Возможность выполнения радиолокационной съемки не зависит от погоды и времени суток. Бортовой радиолокатор может работать в одном из четырех режимов, выбираемых в зависимости от характера снимаемой местности. Для выполнения данного исследования использовались снимки, выполненные в основном режиме работы «Interferometric Wide Swath». (интерферометрический с широким обзором) — основной режим работы при съемке суши, позволяющий выполнять интерферометрическую обработку разновременных пар снимков с целью построения модели рельефа или мониторинга деформаций поверхности, с разрешением 5×20 м и шириной полосы обзора 250 км.

Интерферометрическая обработка пары радиолокационных космических снимков, снятых в разное время для одного и того же участка земной поверхности, позволяет при выполнении некоторых условий определить с сантиметровой точностью локальные смещения на этой поверхности [9].

Высокое разрешение изображения (до 10 м и лучше) при относительно небольших размерах антенны у радиолокатора с синтезированной апертурой достигается за счет движения платформы и цифровой обработки сигнала, накапливаемого за время движения по орбите. Благодаря специальной обработке сигнала, угловое разрешение при такой съемке эквивалентно разрешению радиолокатора с размером антенны порядка длины пройденного за время накопления сигнала пути. Изменение направления луча при сканировании и построении двумерного изображения у современных спутников осуществляется электронным образом, путем индивидуального управления элементами антенны, представляющей собой активную фазированную антенную решетку.

Изображение, получаемое на выходе такого радиолокатора, представляет собой двумерную матрицу, координатами в которой являются угол отклонения луча от оси антенны (азимут) и наклонная дальность (расстояние от спутника до поверхности), а значением — комплексная амплитуда принятого сигнала (т. е. уровень сигнала, зависящий от отражающей способности участка поверхности, и фаза, зависящая от пути, пройденного радиосигналом). Съемка ведется под углом к надиру (для Sentinel-1 в режиме «Interferometric Wide Swath» — от 26° до 40°), поэтому наклонная дальность может быть пересчитана во вторую угловую координату (угол места) и в итоге для каждой ячейки матрицы могут быть вычислены ее

[10] Sentinel-1 SAR User Guide. — URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar (дата обращения: 03.11.2024).

[11] Arianespace to Launch European Union's Copernicus Earth Observation Sentinel-1C Satellite on December 3, 2024 // Arianespace. — URL: https://www.arianespace.com/news/arianespace-to-launch-european-unions-copernicus-earth-observation-sentinel-1c-satellite-on-december-3-2024/ (дата обращения: 03.11.2024).

трехмерные координаты на поверхности Земли. Для точного решения этой задачи необходима информация о движении спутника по орбите (эфемериды, вычисление которых обеспечивает наземная инфраструктура), а также модель рельефа.

Особенностью радиолокационной съемки является тот факт, что фаза принятого сигнала измеряется с большой точностью, т. е. остаток от деления дальности на длину волны (которая для Sentinel-1 с несущей частотой 5,4 ГГц составляет 5,5 см) известен с точностью до сантиметров и возможно до миллиметров, но значение фазы не несет информации, сколько длин волн укладывается в дальность. При этом ячейка разрешения по дальности (т. е. точность, с которой дальность измеряется путем измерения времени распространения сигнала) составляет (для Sentinel-1) от 2,7 до 3,5 м. Эта величина представляет собой точность измерения дальности для одиночного снимка.

Используемая в данном исследовании интерферометрическая обработка — вычисление разности фаз между значениями комплексной амплитуды для одних и тех же участков местности. Для того, чтобы эту разность можно было вычислить и затем пересчитать в смещение участка местности, должно выполняться условие когерентности, т. е. должна быть возможность по записанным данным восстановить геометрическую разность между путями распространения сигнала при зондировании участка местности во время записи двух снимков с точностью не хуже длины волны (иначе возникает неоднозначность определения разности дальностей, и осмысленное значение смещения вычислить невозможно). Для выполнения условия когерентности необходимо, чтобы съемка одного участка местности выполнялась из близких точек орбиты (это обеспечивается соответствующим выбором орбиты и планированием съемок), а также чтобы помимо смещения, участок местности по возможности не претерпел никаких других изменений, влияющих на его отражающую способность и фазу отраженного сигнала, т. е. не должна меняться текстура поверхности. Соответственно, когерентной обработке мешают наличие растительности, сельскохозяйственные работы на полях, выпавший или растаявший снег, строительные работы и т. п.

По этой причине в средней полосе России, где местность обычно покрыта сезонной растительностью и значительную часть времени находится покрыта снегом, условие когерентности между снимками зачастую не соблюдается. Исключением, как показано ниже, являются железнодорожные пути.

Для контроля когерентности во время обработки обычно используют косвенный признак — наличие коррелированности между соответственными участками двух изображений, т. е. в терминах обработки растров — для каждого пиксела вычисляется коэффициент корреляции по некоторой окрестности, и пиксел считается подходящим для обработки, если значение коэффициента корреляции превышает некоторый заданный порог.

В рамках настоящего исследования для интерферометрической обработки использовалось программное обеспечение (ПО), разработку которого координирует Европейское космическое агентство (ЕКА) и которое выпускается под открытой лицензией — STEP.[12] ПО поддерживает как обработку с командной строки в пакетном режиме, так и в приложении с пользовательским интерфейсом (в т. ч. под Windows), позволяющем контролировать все этапы обработки снимков.

Технологическая последовательность построения карты смещений по паре разновременных снимков Sentinel-1 состоит из следующих шагов[13]:

[12] STEP — Scientific Toolbox Exploitation Platform, — URL: https://step.esa.int/main/ (дата обращения: 03.11.2024).

[13] Braun A. Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial / Braun A., Veci L. 2021. URL: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf (дата обращения: 03.11.2024).

- загрузка данных (пары снимков на одну и ту же область, полученных в разное время) с сайта программы Copernicus[14] или NASA EarthData[15];
- выбор областей снимков для обработки;
- загрузка точных параметров орбиты спутника (эфемериды уточняются постобработкой в наземном сегменте с задержкой до 20 дней после съемки, поэтому точные эфемериды не хранятся в архиве со снимком и загружаются отдельно;
- совмещение снимков друг с другом (coregistration) — этап, на котором восстанавливается геометрия распространения сигнала с учетом точных параметров орбиты и ЦМР, и на основе этой информации изображения совмещаются друг с другом с субпиксельной точностью;
- расчет интерферограммы (карты разности фаз в каждом пикселе), а также карты когерентности.

Выполнение полного цикла интерферометрической обработки пары радиолокационных снимков на примере территории Нижегородской области рассмотрено автором в работе [10].

Объект и результаты исследования

26 декабря 2020 года на перегоне Арзамас–Пешелань (координаты: 55°21'47"N, 43°48'13"E) из-за проседания грунта вследствие образования карстового провала непосредственно под путями сошел с рельсов локомотив грузового поезда. В связи с густой облачностью в этот период времени космическая оптическая съемка не дает никакой информации о событии. Фотография с места аварии из СМИ приведена на рисунке 1.

Рисунок 1. *Результат образования провала под железнодорожными путями на перегоне Арзамас — Пешелань 26 декабря 2020 года (источник: пресс-служба Приволжской транспортной прокуратуры[16])*

[14] Copernicus Data Space Ecosystem. — URL: https://dataspace.copernicus.eu/ (дата обращения: 03.11.2024).

[15] NASA EarthData. — URL: https://www.earthdata.nasa.gov/ (дата обращения: 03.11.2024).

[16] Под Арзамасом локомотив сошел с рельсов из-за карстового провала // Нижний Новгород Онлайн. — URL: https://www.nn.ru/text/incidents/2020/12/26/69662006/ (дата обращения: 03.11.2024).

Участок отличается повышенной карстоопасностью, в 2008 году на этом участке, в районе 226 и 227 км дороги, было уложено несколько противокарстовых укреплений — лежней [17]; до этого укрепление пути в этом месте проводилось в 1995 году [18] (после предыдущего крушения).

Далее приведен анализ аварии, проведенный с помощью совместного использования данных оптико-электронной съемки и радиолокационных интерферограмм.

На рисунке 2 приведено изображение местности вокруг места аварии из спутникового покрытия Google (съемка в июле 2023) и карта когерентности на ту же местность между снимками Sentinel-1 от 5 и 17 декабря 2020 года (до аварии). По изображению видно наличие достаточно высоких значений когерентности вдоль всего отрезка железной дороги.

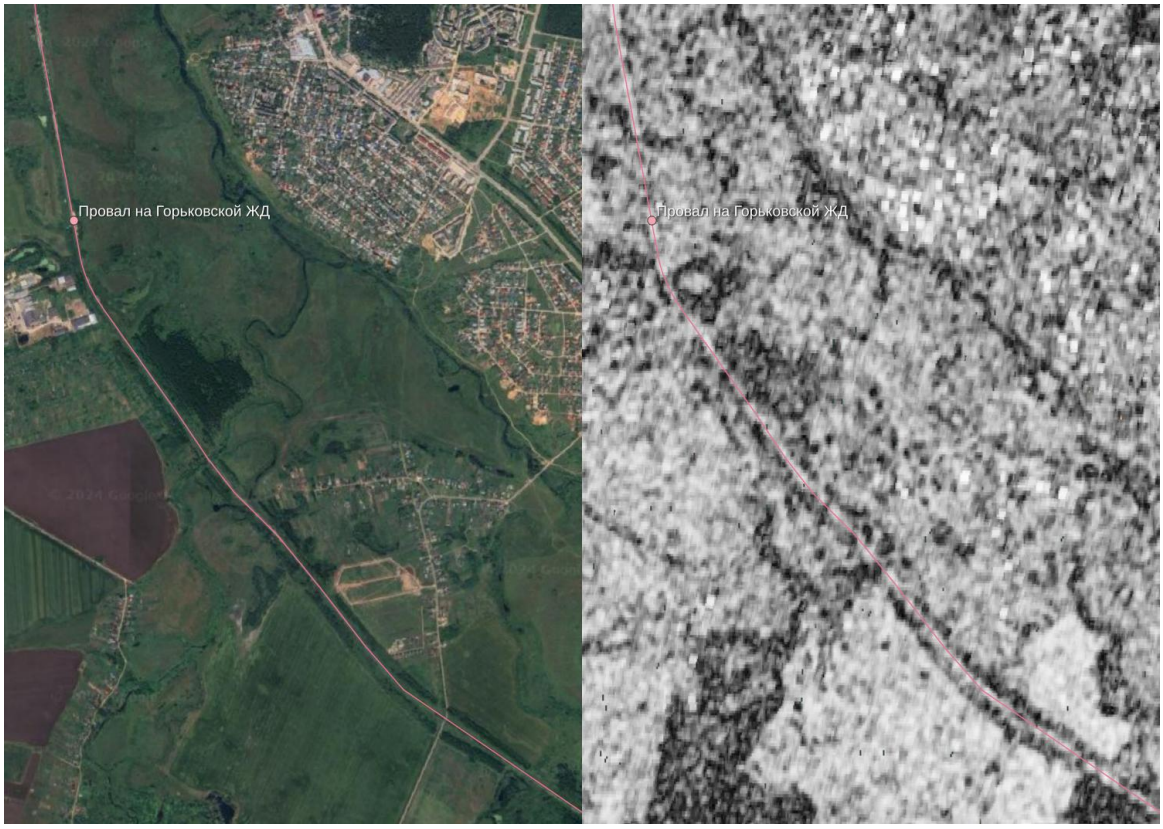

Рисунок 2. *Окрестности места аварии, спутниковое покрытие Google (июль 2023 года, слева) и карта когерентности интерферограммы снимков Sentinel-1 от 5 и 17 декабря 2020 г. (справа) (составлено автором с помощью геоинформационной системы QGIS[19])*

На рисунке 3 приведены карты когерентности в небольшой окрестности вокруг места провала на несколько пар дат от 23 декабря 2019 года до 10 января 2021 года. Карты смещений ни в одном случае не показали никаких заметных сдвигов местности и в данной работе не приводятся. Между снимками 23 декабря 2019 и 5 декабря 2020, т. е. с интервалом год, когерентность ожидаемо отсутствует — в течение года с учетом географических характеристик Нижегородской области в любой точке местности происходит достаточно изменений.

[17] К карсту — конструктивный подход // Волжская магистраль. — 2008. — № 18. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=559924 (дата обращения: 03.11.2024).

[18] Инженерная мысль против карста // Волжская магистра. — 2008. — № 12. — URL: https://gudok.ru/zdr/168/?ID=559584 (дата обращения: 03.11.2024).

[19] QGIS. — URL: https://www.qgis.org/ (дата обращения: 03.11.2024).

Изучение серии снимков Sentinel-2 в сервисе Sentinel Hub [20] (который удобно использовать для быстрого просмотра временных серий снимков) показывает, что снежный покров на изучаемой территории в 2020 году установился между 21 ноября и 1 декабря. По этой причине интерферограмма между 23 ноября и 5 декабря 2020 года также показывает низкую когерентность. В области провала на интервалах 5 декабря — 17 декабря и 10 декабря — 22 декабря сохраняется высокая когерентность.

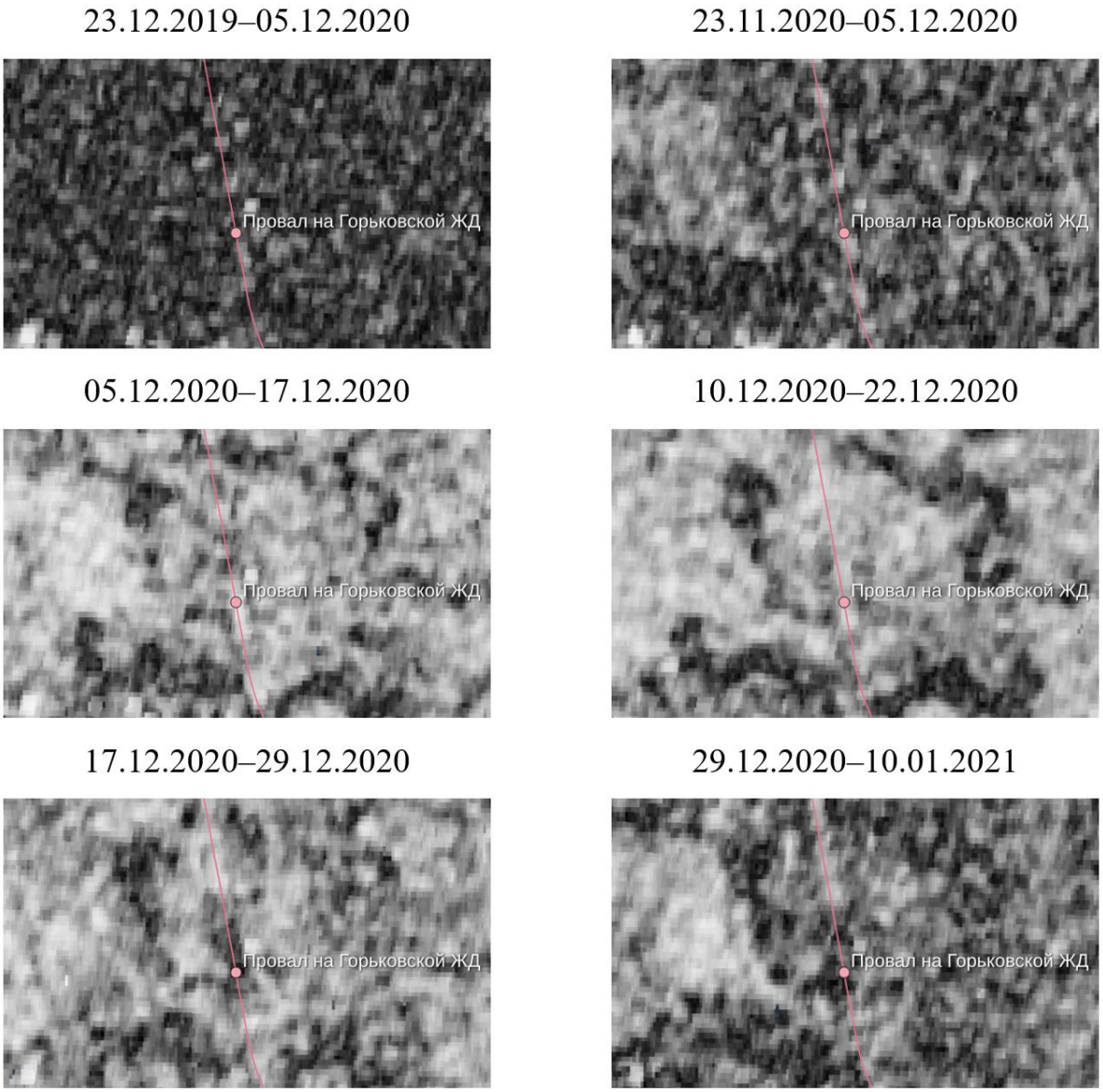

Рисунок 3. *Карты когерентности интерферограмм на окрестность места аварии для нескольких пар снимков Sentinel-1 до и после аварии (над каждым фрагментом карты когерентности указаны даты снимков, составляющих интерферометрическую пару; составлено автором с помощью QGIS)*

На интервале 17 декабря — 29 декабря в точке провала когерентность резко падает до 0,05 (при значениях на соседних ненарушенных участках около 0,7) и сохраняется пониженной на интервале 29 декабря 2020 — 10 января 2021.

[20] Sentinel Hub. — URL: https://www.sentinel-hub.com/ (дата обращения: 03.11.2024).

Такая динамика карт когерентности в целом ожидаема. Однако интерес вызывает карта когерентности для пары снимков 5 декабря — 17 декабря. На ней в области будущего провала отсутствуют какие-либо особенности, однако присутствуют зоны пониженной когерентности на участках путей, вблизи которых находятся два небольших водоема, которые судя по их виду на покрытии высокого разрешения Google имеют карстовую природу. Увеличенный фрагмент карты когерентности и соответствующий фрагмент местности на покрытии Google приведены на рисунке 4.

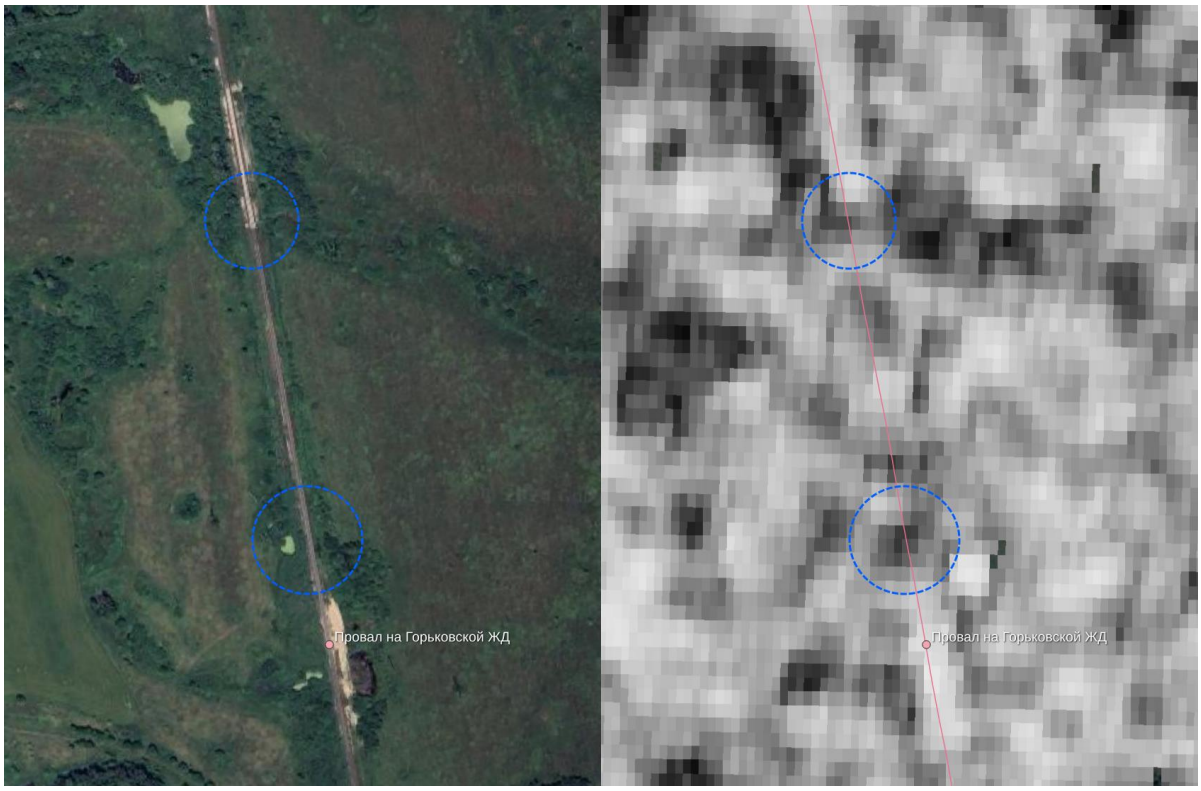

Рисунок 4. *Окрестность места аварии, спутниковое покрытие Google за июль 2023 г. (слева, составлено автором с помощью Google Планета Земля[21]) и карта когерентности для снимков 5 и 17 декабря 2020 года (справа), пунктирными кругами выделены области низкой когерентности (составлено автором с помощью QGIS)*

При этом, на серии снимков Sentinel-2 в оптическом диапазоне, относящихся к этому периоду времени (в течение которого над исследуемым участком не было облачности) отсутствуют какие-либо изменения (рисунок 5). Во время выполнения данного исследования не было обнаружено других источников информации, позволяющих уточнить состояние исследуемого участка местности в течение декабря 2020 года. Тем не менее, одним из возможных объяснений является изменение состояния всей карстовой системы в окрестности места аварии, начавшееся за некоторое время до происшествия — по общему виду окрестности на рисунке 4 слева видно, что железнодорожные пути в этом месте пересекают один большой карстовый участок (с максимальным уровнем карстоопасности согласно карте карстоопасности Нижегородской области[22]).

[21] Google Планета Земля. — URL: https://earth.google.com/ (дата обращения: 03.11.2024).

[22] Карта развития карстовых процессов территории Нижегородской области масштаба 1:1 000 000 — Приложение к документу: «Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области». Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области. — Нижний Новгород, 2012.

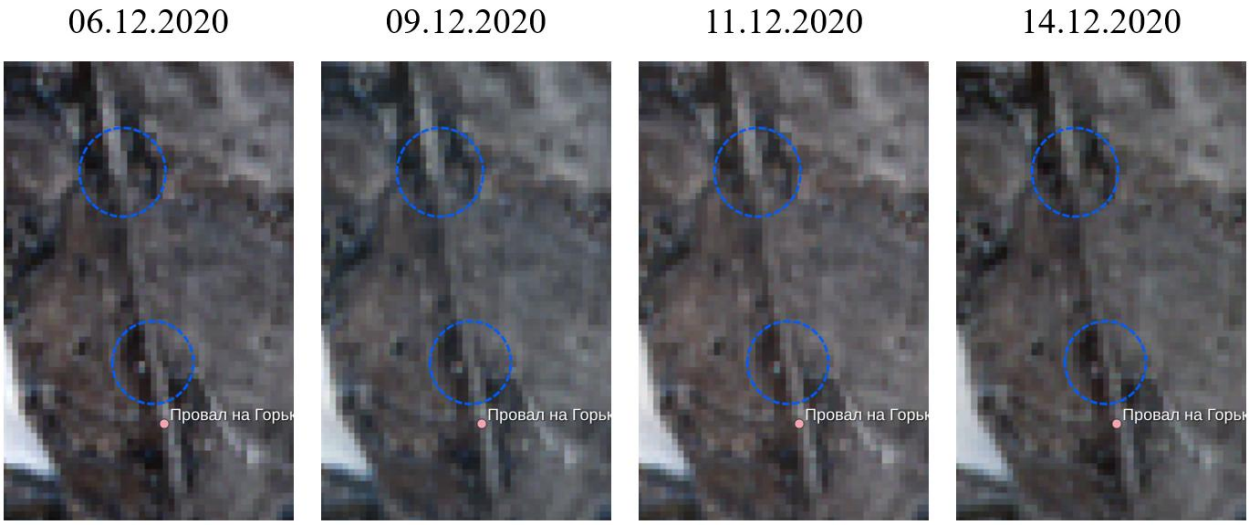

Рисунок 5. *Фрагменты снимков Sentinel-2 в оптическом диапазоне на окрестность провала за период 06.12.2020–14.12.2020, пунктиром отмечены области низкой когерентности на карте когерентности на рисунке 4 (составлено автором с помощью QGIS)*

Выводы

Описанная методика демонстрирует принцип использования комбинации данных оптико-электронной и радиолокационной съемки при анализе карстовых явлений на основе данных космической системы Sentinel.

В состав российской группировки спутников ДЗЗ также входят радиолокационные спутники — семейство «Кондор-ФКА» (один аппарат запущен в 2023 году; на момент написания данной статьи, космический аппарат «Кондор-ФКА» № 2 готовится к запуску в ноябре 2024 года[23]) — серия спутников, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой S-диапазона (длина волны 10 см) с пространственным разрешением до 1 м и возможностью интерферометрической обработки снимков, при этом для группировки из двух спутников должна быть обеспечена повторная съемка одного объекта на поверхности Земли с вероятностью 0,9 с интервалом 24–26 часов при обеспечении интерферометрической съемки объектов.[24]

Такая космическая система при обеспечении доступа к ее данным соответствующим службам и разработке соответствующего программного обеспечения может обеспечить своевременное выявление деформационных процессов на железнодорожных путях на основе анализа карт когерентности, в особенности при их использовании совместно с другими данными дистанционного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография. — Москва: РУДН, 2017. — 328 с. — EDN WMTGUN.

[23] На Восточный доставлен второй спутник «Кондор-ФКА» // Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». — URL: https://www.roscosmos.ru/40872/ (дата обращения: 03.11.2024).

[24] КА «Кондор-ФКА» — Госкорпорация «Роскосмос». — URL: https://www.roscosmos.ru/38951/ (дата обращения: 03.11.2024).

2. Хоменко В.П. Причины и механизм карстового провалообразования на территории г. Дзержинска Нижегородской области // Карстоведение — XXI век: теоретическое и практическое значение. Материалы международного симпозиума. — Пермь: Пермский университет, 2004. — С. 208–212. — EDN VMSKIF.

3. Джуманьязова Г.И. Оптоволоконные технологии для мониторинга объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» / Джуманьязова Г.И., Хлудеева М.А. // Современные тенденции развития транспортной отрасли: материалы Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 15–16 февраля 2024 года. — Нижний Новгород: Самарский государственный университет путей сообщения, 2024. — С. 311–317. — EDN NZDSMH.

4. Крылаткова Н.А. Результаты инженерно-сейсмических исследований карста // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2008. — № 8. — С. 188–190. — EDN KVXTDX.

5. Антоновская Г.Н. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути / Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ромен Ю.С., Данилов А.В. // Транспортные системы и технологии. — 2019. — Т. 5, № 4. — С. 96–114. — DOI 10.17816/transsyst20195496-114. — EDN HENVFO.

6. Голиков Ю.В. Диагностика состояния железнодорожной насыпи и ее основания бесконтактным электромагнитным методом // Инновационный транспорт. — 2017. — № 4(26). — С. 34–37. — DOI 10.20291/2311-164X-2017-4-34-37. — EDN ZXJQIN.

7. Немцова С.А. Особенности реконструкции инфраструктуры железных дорог на закарстованных территориях / Немцова С.А., Телятникова Н.А., Зайцев А.А., Рогов А.А. // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы VI Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 125-летию РУТ (МИИТ), Москва, 25–26 ноября 2021 года. — Москва: Издательство «Перо», 2021. — С. 90-95. — EDN UDZXEX.

8. Ghorbanzadeh O. An Application of Sentinel-1, Sentinel-2 and GNSS Data for Landslide Susceptibility Mapping / Ghorbanzadeh O., Didehban K., Rasouli H. et al. // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020; 9(10), 561. — DOI 10.3390/ijgi9100561.

9. Ferretti A. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007) / Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Claudio Prati C., Rocca F., Massonnet D. — ESA Publications, The Netherlands, 2007. — ISBN 92-9092-233-8. — URL: https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19 (дата обращения: 03.11.2024).

10. Тодорова А.Й. Изучение применимости спутниковой радиолокационной съемки для анализа закарстованности территорий на тестовых участках в Нижегородской области / Тодорова А.Й., Лаврусевич А.А. // Потаповские чтения — 2023: сборник материалов VIII ежегодной Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова (г. Москва, 16 мая 2023 г.); НИУ МГСУ. — Москва: Издательство МИСИ — МГСУ, 2023. — С. 90–98. — EDN BOHBHP.

Todorova Asya Yordanova
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
E-mail: assia.genova@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1061781

Application of space-based radar imaging for detection of emergency situations caused by karst on railways of Nizhny Novgorod region

Abstract. The article considers the problem of monitoring and prompt detection of emergency situations, caused primarily by karst phenomena, on railway tracks in the Nizhny Novgorod region. Brief information on accidents caused by karst phenomena is presented and the currently used monitoring methods are considered — mainly contact ones, as well as the use of optical survey from unmanned aerial vehicles and optical space imagery. Author proposes to use satellite radar data to detect anomalies on railway tracks, for which it is proposed to use interferometric processing of pairs of radar images, but instead of a displacement map, which, taking into account the nature of the terrain and climate of the Nizhny Novgorod region, turns out to be largely useless, it is proposed to use an interferogram coherence map. A detailed analysis of radar survey data of the accident area on the Arzamas — Peshelan section in 2020, obtained from the Sentinel-1 satellite of the European Space Agency and available in the public domain, is carried out. The characteristic appearance of interferogram coherence maps and local features that appear on coherence maps but not on optical images are shown. The possibility of using radar data together with other Earth remote sensing data and cartographic data for monitoring emergency situations is demonstrated. Considering ongoing formation of Russian radar satellite constellation Kondor-FKA, data from which should be suitable for forming interferograms, it is proposed to use them as additional information for remote monitoring of the state of the railway track.

Keywords: remote sensing; space imagery; radar imaging; karst; railway; emergency; radar interferometry