

Разработка модуля расчёта нормализованного индекса разностной активности открытых работ на угольных месторождениях на базе радарных данных Sentinel-1

С. Е. Попов, В. П. Потапов, Р. Ю. Замаев

*Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: popov@ict.sbras.ru*

Интенсивная добыча открытым способом может привести к значительной деформации грунта на больших площадях, что влечёт за собой тяжёлые экологические и техногенные последствия. Поэтому крайне необходим непрерывный дистанционный мониторинг для изучения различных поверхностных воздействий, особенно в труднодоступных районах, где частые наблюдения недоступны по ряду причин (постоянные горные работы, взрывные работы в карьерах и т. д.). В настоящей статье показаны подходы к разработке высоконагруженных вычислительных процедур для расчёта нормализованного индекса разностной активности, а также процесс их интеграции в систему дистанционного мониторинга. Процедуры представлены в виде специального структурированного графа в формате JSON-файла. Каждый элемент графа соответствует обычному Java-классу в соответствии со спецификациями программного интерфейса Sentinel-1 API Toolbox. Граф выполняется поэтапно внутри программной сущности в терминах платформы Docker, называемой контейнером. Каждый контейнер включает в себя полный стек программных библиотек, необходимых для расчёта индекса активности. Для запуска процесса выполнения графа в контейнере создаётся конфигурационный файл (docker-compose). Контейнеризация позволяет автоматизировать процесс развёртывания и интеграции за счёт абстрагирования и инкапсуляции взаимодействия между системой мониторинга и программным кодом. В статье продемонстрирован программный модуль, интегрированный в разработанную интерактивную систему мониторинга, предназначенную для настройки и запуска контейнеров, отображения результатов в виде композитной RGB-схемы на онлайн-картах. Система построена в соответствии с трёхуровневой компонентной моделью (уровень внешнего интерфейса, промежуточного программного обеспечения и внутренней бизнес-логики). Доступна по адресу <http://radarmon.ict.nsc.ru:8100>. С целью тестирования предложенного подхода были использованы наборы данных когерентных изображений Sentinel-1A/B InSAR для расчёта значений индекса NDAI для разреза Краснобродский (Кемеровская обл., Россия) за период с апреля 2019 г. по май 2021 г. Полученная RGB-схема показала, что активное формирование отвалов осуществлялось вдоль технических дорог и неиспользуемых участков. Это подтвердили ретроспективные снимки на базе ПО Google Earth.

Ключевые слова: нормализованный индекс разностной активности, радарная интерферометрия, когерентность, Sentinel-1, контейнеризация

Одобрена к печати: 10.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-62-76

Введение

Открытая разработка рудных месторождений представляется более предпочтительным способом добычи полезных ископаемых, чем подземная, ввиду возможности крупномасштабного освоения и получения ископаемых за меньший срок с большим экономическим эффектом. С другой стороны, при экстремально интенсивной добыче открытым способом происходят резкие изменения поверхности на участках очень большой площади, что приводит к катастрофическим экологическим и техногенным последствиям, таким как обезлесение, разрушение почвенного покрова, гидрологические нарушения, нарастание крупных отвалов и, как следствие, селевым и оползневым эффектам и пр. (Заушинцева, Кожевников, 2017; Зеньков и др., 2016; Калабин и др., 2013; Kobayashi et al., 2014; LaJeunesse et al., 2016; Lobo, 2018; Murguía et al., 2016). Необходим постоянный мониторинг объектов открытой добычи для изучения воздействия, особенно в районах с ограниченным доступом, где частые наземные измерения недоступны по ряду причин (интенсивная подработка пластов, взрывные работы).

Среди ансамбля всех методов и программных решений мониторинга неоспоримое преимущество имеет дистанционное зондирование Земли на основе радарных спутниковых данных. Они позволяют вести непрерывное наблюдение независимо от времени суток и погодных условий. Такие данные широко используются при изучении просадок, оползней, построения цифровых высотных моделей рельефа (ЦМР), расчёта скоростей смещений земной поверхности.

В работах (Lee, 2017; Ross et al., 2016; Wu et al., 2020) демонстрируется применение технологий LiDAR для получения данных о высоте рельефа с высокой точностью, для подтверждения деятельности разрезов до и после выемки пластов, оценивается глубина уровней разрезов на основе дифференциации свойств и признаков ЦМР, полученной из интерферограмм снимков аппарата KOMPSAT-5 (*англ.* Korean Multi-Purpose Satellite) и ЦМР формата SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission). Проводится анализа высот на основе данных ЦМР (SRTM3 и TanDEM-X (*от англ.* TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement)) и метода многомасштабной сегментации. В работе (Khalil, Saad-ul-Haque, 2018) показан эффективный метод обнаружения случайных изменений на поверхности земли, использующий расчётные значения когерентности интерферометрических изображения.

В работе (Paradella et al., 2015) использован интегрированный SAR-анализ (*англ.* synthetic aperture radar, радар с синтезированной апертурой), основанный на данных спутникового аппарата TerraSAR-X, для мониторинга нестабильности грунта на карьерах. В исследовании (Hartwig et al., 2013) применён метод интерферометрии постоянного рассеивателя (*англ.* Persistent Scatterer Interferometry — PSI) для мониторинга деформации откосов шахт. В работе (Chatterjee et al., 2010) за счёт анализа значений когерентности и высот ЦМР на спутниковых снимках выявляются действующие и закрытые карьеры, проводятся разграничения вскрышных пород и угольных отвалов от окружающей территории. В публикации (Moon, Lee, 2021) представлен нормализованный индекс разностной активности (*англ.* Normalized Differential Activity Index — NDAI), позволяющий на основе рассчитанных коэффициентов по усреднённым во времени значениям когерентности продолжительных серий радарных данных определять зоны активности угольных разрезов, карьеров и других предприятий, осуществляющих добычу ископаемых открытым способом.

Необходимо сказать, что большинство узкоспециализированных методов обработки и анализа спутниковых радарных данных, в том числе и представленных в обзоре, не реализованы в виде полноценных программных модулей. Они оставлены в качестве экспериментальных работ без доступа к программным алгоритмам, а некоторые из них носят чисто теоретический характер.

Полные расчётные схемы пред- и постобработки требуют от пользователя ручной подготовки входных данных и запуска/перезапуска программных скриптов на каждом шаге выполнения (Hartwig et al., 2013; Julzarika, 2018; Malmgren-Hansen et al., 2020; Moon, Lee, 2021; Wang et al., 2021).

Так, например, в работе (Mancini et al., 2021) описывается полная схема интеграции и процессинга программного обеспечения (ПО) SNAP © ESA (Sentinel Application Platform, European Space Agency) с программной библиотекой расчёта скоростей смещений методом постоянных рассеивателей (StampPS). На базе специализированных диаграмм (XML-формат) приведена схема предпроцессинга пары радарных снимков, включая этапы извлечения подполос (TOPSSplit), корегистрации (Back-Geocoding), развёртки фазы (Phase Unwrapping) и др., которые требуют ручного управления параметрами. Например, на этапе TOPSSplit необходим выбор полосы съёмки и соответствующего ей номера подполосы в зависимости от географических координат выбранной области, что, учитывая количество снимков (от 30) и возможность смещения съёмки на несколько подполос, становится трудоёмкой задачей. А для подготовки к этапу Phase Unwrapping необходим выбор скорегистрированных и интерферометрических изображений, согласованных по датам съёмки. Аналогичные проблемы наблюдаются для алгоритмов обработки радарных данных (метод малых базовых линий, метод поиска когерентных изменений, нормализованный индекс разностной активности NDAI и др.), описанных в работах (Malmgren-Hansen et al., 2020, Moon, Lee, 2021; Wang et al., 2019).

Лучше ситуация обстоит с проприетарным ПО (SARscape, Gamma, Erdas и др.), но оно в основном распространяется как стационарные приложения и зачастую остаётся недоступным в коммерческом плане. Однако даже открытое программное обеспечение (GMTSAR, StamPS, MintPy и пр.) написано преимущественно в виде скриптов на различных языках программирования, имеет сложность развёртывания и установки вследствие дифференциации версии сторонних библиотек, а также отсутствия удобного графического интерфейса.

Всё это накладывает существенные ограничения на использование методов и алгоритмов радарной интерферометрии в виде интегрируемых самодостаточных модулей в автоматизированных системах мониторинга, в том числе и в онлайн-режиме, для широкого круга научной общественности.

Таким образом, проведённый анализ открытых источников литературы и программных средств в области обработки спутниковых радарных данных показал, что актуальной и востребованной остаётся задача разработки открытого модульного программного обеспечения с онлайн-доступом в виде интегрированных предметных программных алгоритмов для мониторинга активности добычи полезных ископаемых.

Цель и задачи

Рассматриваемый в работе индекс NDAI открывает возможности исследования горнодобывающей деятельности в районах накопления и выемки карьеров дистанционно, используя временные ряды изображений космического аппарата Sentinel-1. Особенно это актуально для угледобывающих регионов России, например Кузбасса. Индекс NDAI применяется в качестве индикатора активности. Он позволяет справиться с проблемой пространственной и временной (погода) декорреляции изображений. С помощью методики расчёта стабильных точек можно исключать сильно зашумлённые некогерентные изображения, например в зимней период съёмки.

Однако авторам не удалось найти какой-либо программной реализации данной методики. В теоретических работах приведены довольно сложные схемы расчётов с большими временными сериями радарных снимков (порядка 3 лет) без автоматизации как этапов предобработки (этапы от выбора подобласти до получения снимков с отфильтрованным каналом значений когерентности), так и этапов постобработки, например формирования RGB-схемы (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) в виде GeoTiff-файлов с возможностью их использования в стороннем ПО (QGIS, ArcGIS и др.). Ровно как и без предоставления возможности открытого доступа к расчётам индекса с использованием графического интерфейса в сети интернет либо в виде стационарного модуля (контейнера) с возможностью его простой установки и настройки.

Поэтому целью настоящей работы ставится разработка программного модуля для расчёта индекса разностной активности для системы мониторинга деятельности горнодобывающих предприятий на основе спутниковых радарных данных.

Предлагается решить следующие задачи:

1. Разработка программного модуля для алгоритма полной схемы расчёта индекса NDAI.
2. Адаптация алгоритма для контейнерного выполнения на платформе Docker с возможностью интеграции модуля в различные системы мониторинга.
3. Разработка графического интерфейса модуля в виде веб-сервиса с открытым доступом в сети интернет.

Исходные данные

Исходными данными послужили спутниковые радарные снимки аппарата Sentinel-1. Для дифференциальной интерферометрии использовался канал типа IW (*англ.* Interferometric Wide Swath) с вертикальной поляризацией VV (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/>). Территория охвата — Кемеровская обл., Россия, временной интервал —

2019–2021 гг. Данные были получены из открытого ресурса в сети интернет Copernicus Open Access Hub (система Европейских центров морских прогнозов, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) Европейского космического агентства (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>).

Метод расчёта индекса разностной активности

Алгоритм расчёта индекса базируется на математической модели, описанной в работе (Moon, Lee, 2021). Рассматривается стек предварительно обработанных радарных снимков согласно схеме на *рис. 1* со значениями когерентности в каждой точке снимка (канал когерентности).

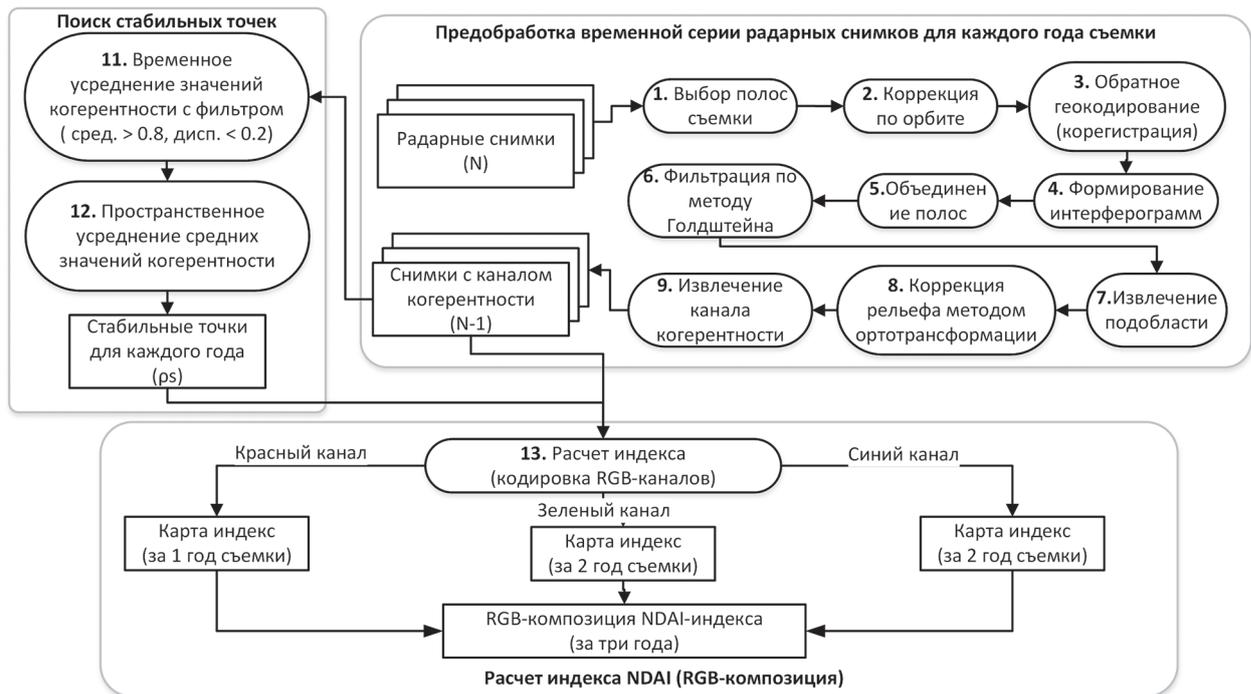


Рис. 1. Общая схема расчёта нормализованного индекса разностной активности NDAI

Снимки в стеке сгруппированы по годам (3 года в общем). Обозначим количество снимков за 1–3-й года Y_1 , Y_2 и Y_3 соответственно. Все снимки имеют одинаковое количество точек, равное WH , где W — ширина снимка, H — высота. Также возможно, что $Y_1 \neq Y_2 \neq Y_3$. Для каждой точки в группе рассчитывается временное усреднение и дисперсия следующим образом:

$$\rho_{\text{сред}}(i, j)_l = \sum_{k=1}^{Y_l} c_k(i, j), \quad \rho_{\text{дисп}}(i, j)_l = \frac{1}{Y_l - 1} \sum_{k=1}^{Y_l} (c_k(i, j) - \rho_{\text{сред}}(i, j))^2,$$

где $i = 1, \dots, H; j = 1, \dots, W; l = 1, \dots, 3; c_k(i, j)$ — значение когерентности в точке с координатами (i, j) . Для каждой группы отбрасываются те точки, у которых $\rho_{\text{сред}}(i, j)_l > 0,8$ и $\rho_{\text{дисп}}(i, j)_l > 0,2$. Количество оставшихся точек в группах обозначим $Y_l^{\text{вп}}$, а их значения — $\rho_{\text{сред}}(u, v)_l$, где $u \in [1, H]$ и $v \in [1, W]$.

Для каждой группы вычисляется значение стабильной точки путём пространственного усреднения по всем $\rho_{\text{сред}}(u, v)_l$ следующим образом:

$$\rho_{\text{стаб}} = \frac{1}{Y_l^{\text{вп}}} \sum_{\forall u, v} \rho_{\text{сред}}(u, v)_l.$$

Далее, для всех точек снимков в группе вычисляются значения индекса NDAI:

$$\text{NDAI}(i, j)_{k,l} = \frac{\rho_{\text{стабл}} - c_k(i, j)}{\rho_{\text{стабл}} + c_k(i, j)},$$

где $l = 1, \dots, 3$. Для каждой группы снимков рассчитывается временное усреднение индекса $\text{NDAI}(i, j)_{k,l}$:

$$\text{NDAI}(i, j)_l = \sum_{k=1}^{Y_l} \text{NDAI}(i, j)_{k,l}.$$

При этом из расчёта можно исключить точки, значения когерентности $c_k(i, j)$ которых меньше заданного порога (в среднем 0,5).

Значения $\text{NDAI}(i, j)_l$ каждой из групп кодируют цвета (каналы) изображения, соответственно красный ($l = 1$), зелёный ($l = 2$) и синий ($l = 3$). В результате комбинации этих каналов получается карта нормализованного индекса активности.

Кодирование среднегодовых значений индекса NDAI в композитное RGB-изображение позволяет показать годовую тенденцию добычи полезных ископаемых открытым способом на разрезах. По изменению цветовых схем можно выделять типы отвалов, такие как расширяющиеся, усадочные или переходные.

Программная реализация

Предобработка данных

Программная реализация алгоритма расчёта индекса NDAI базируется на интерфейсе программирования приложений Sentinel-1 API Toolbox (S1TBX). Он построен на языке Java и содержит классы, реализующие функциональность каждого из этапов (см. *рис. 1*). Полное описание его классов и параметров доступно по ссылке <https://github.com/senbox-org/s1tbx>. Алгоритм разработан на базе языка Java — расчётная часть, на языке JavaScript разработан веб-сервис и онлайн-графическая часть модуля. Модуль интегрирован в программный комплекс MONITOR-RADAR (Попов и др., 2020, 2021).

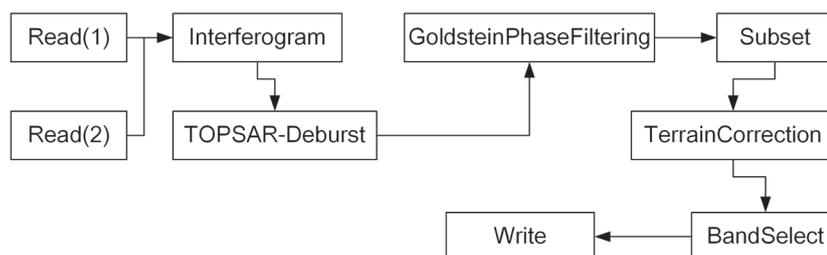


Рис. 2. Блок-схема графа для расчётов этапов с 4 по 9 индекса NDAI для API S1TBX

Каждый этап расчёта схемы соответствует его базовому классу согласно блок-схеме на *рис. 2*. Общее описание базовых классов предобработки радарных данных приведено в работах (Попов и др., 2020, 2021). Каждый базовый класс имеет свои настроечные параметры, задаваемые в файле метаописания (см. *рис. 2*) текущего этапа. S1TBX позволяет описывать этап или цепочку этапов обработки входных изображений при помощи специальных графов. Благодаря этому можно отказаться от имплементации в программном коде всех наследуемых функций интерфейса базового класса. Для большинства этапов достаточно указать расположение входных файлов, целевую директорию для результатов обработки (выходные файлы), конфигурационный файл параметров (в формате JSON) и файл метаописаний графа (в формате XML).

Метаописание графа формируется посредством его визуального представления в виде блок-схемы в ПО ESA SNAP (см. *рис. 2*). Блок-схема (см. *рис. 2*) соответствует файлу метаописания (*рис. 3*) с настроечными параметрами по умолчанию (выделены пунктиром).

```

<graph id="Graph">
  <Version>1.0</Version>
  <node id="Read" ...>
  <node id="TOPSAR-DE burst" ...>
  <node id="TopoPhaseRemoval" ...>
  <node id="Subset" ...>
  <node id="GoldsteinPhaseFiltering" ...>
    <operator>GoldsteinPhaseFiltering</operator>
    <sources ...>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <alpha>1.0</alpha>
      <FFTSIZESTRING>64</FFTSIZESTRING>
      <WINDOWSIZESTRING>3</WINDOWSIZESTRING>
      <USECOHERENCEMASK>false</USECOHERENCEMASK>
      <COHERENCETHRESHOLD>0.2</COHERENCETHRESHOLD>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Interferogram" ...>
  <node id="BandSelect" ...>
  <node id="Write" ...>
  <applicationData id="Presentation" ...>
</graph>

```

Рис. 3. Метаописание графа для этапов с 4 по 9 расчёта индекса NDAI

```

{
  "label": "Goldstein Phase Filtering",
  "name": "goldstein_phase_filtering",
  "description": "Adaptive algorithm proposed by Goldstein and Werner.",
  "parameters": {
    "alpha": {...},
    "FFTSIZESTRING": {
      "index": 1,
      "name": "FFTSIZESTRING",
      "label": "FFT Size",
      "type": "inputTypes.select",
      "value": 64,
      "defaultvalue": 64,
      "options": [32, 64, 128, 256]
    },
    "WINDOWSIZESTRING": {...},
    "USECOHERENCEMASK": {...},
    "COHERENCETHRESHOLD": {...}
  }
}

```

Рис. 4. Конфигурационный файл параметров базового класса GoldsteinPhaseFiltering для этапа № 6 схемы расчёта индекса NDAI

Настроечные параметры по умолчанию изменяются посредством конфигурационного файла JSON-формата (*рис. 4*). Использование конфигурационных файлов позволяет изменять поведение расчётных этапов без переопределения и перекомпиляции программного

кода модуля. JSON-формат файла поддерживается как объектный тип данных в используемых языках. Это обеспечивает быструю настройку параметров без изменения сложной структуры метаописания графа. При запуске расчёта в программном коде считывается конфигурационный файл и создаётся копия файла графа. При помощи специального класса GraphIO параметры конфигурационного файла интегрируются в метаописание графа. Это позволяет всегда иметь актуальную версию графа.

Запуск расчётов отдельных групп этапов в общей схеме выполнения осуществляется при помощи специализированной оболочки запуска графов из ПО ESA SNAP GPT (http://step.esa.int/docs/tutorials/SNAP_CommandLine_Tutorial.pdf). Имплементация конфигурирования и запуска графов интегрирована в программный код модуля (<https://github.com/ogidog/monitor-radar-core>).

Контейнеризация модуля расчёта индекса

Запуск расчёта индекса осуществляется с использованием технологии контейнеризации на основе Docker (<https://docs.docker.com/get-started/>).

Docker — это платформа для разработки, развёртывания и запуска контейнерных приложений. Docker container (контейнер) — это набор процессов, изолированных от основной операционной системы. Приложения работают только внутри контейнеров и не имеют доступа к основной системе, за исключением явно подключаемых директорий при запуске контейнера. Например, все промежуточные результаты расчётов схемы (см. *рис. 1*) сохраняются внутри виртуального диска контейнера, пользователю доступен только конечный результат — RGB-схема в виде GeoTiff-файла. То есть многопользовательский запуск модуля «не засоряет» хост-систему рабочими файлами. После остановки контейнера его состояние обнуляется, все промежуточные файлы внутри контейнера удаляются.

```
# В качестве основного образа используется ОС Ubuntu
FROM ubuntu:18.04

# Устанавливаем зависимости для работы модуля
RUN apt-get update && apt-get install -y zip mc time \
unzip less csh default-jre libblas-dev liblapack-dev gawk procs

# Устанавливаем ESA SNAP для выполнения графов
ADD esa-snap_all_unix_8_0.sh /tmp/snap
RUN /tmp/snap/esa-snap_all_unix_8_0.sh -q

# Устанавливаем Python для выполнения основного расчета NDAI
RUN apt install -y python3.7
RUN apt-get install -y python3-pip python3-matplotlib
python-gdal libgdal-dev

# Устанавливаем библиотеку предобработки радарных снимков
# и расчета NDAI
RUN mkdir -p /opt/ndai_proc/
ADD ndai_proc /opt/ndai_proc/

# Пути к исполняемым файлам
ENV PATH="/usr/local/snap/bin:/usr/local/bin:/usr/bin:\
/usr/local/sbin:/usr
/sbin:/usr/local/snap/jre/bin:/opt/ndai_proc/bin:${PATH}"

# Основной скрипт запуска расчетов в контейнере
ENTRYPOINT ["/opt/ndai_proc/bin/start.sh"]
```

Рис. 5. Фрагмент Dockerfile для сборки и контейнеризации модуля расчёта индекса NDAI (<https://hub.docker.com/r/ogidog/ndai>)

Контейнеры позволяют полностью автоматизировать процесс развёртывания приложения, так как включают в себя все нужные зависимости и порядок выполнения действий. В классическом подходе для установки ПО может потребоваться провести несколько действий: выполнить скрипт, изменить файлы настроек и т. д. Также контейнеры упрощают развёртывание на нескольких серверах. В классическом подходе, для того чтобы развернуть одно и то же приложение на нескольких машинах, нужно будет повторять одни и те же действия. Это упрощает перенос приложения на другую инфраструктуру. Особенно если речь идёт о масштабируемой мультисервисной системе мониторинга, работающей на нескольких серверах и с несколькими расчётными модулями с различной функциональностью, требующих контроль версий вспомогательных библиотек.

Для контейнеризации и развёртывания модуля расчёта индекса использовался специально настроенный и собранный образ Docker Image. Это неизменяемый файл (образ), из которого разворачиваются контейнеры. Программный код и зависимости (библиотеки) упаковываются в образ, из которого в момент запуска создаётся контейнер. Для сборки образа используется Dockerfile — это набор инструкций (команд) для сборки образа (<https://docs.docker.com/get-started/>). В нём указываются все программы, зависимости и другие образы, например операционной системы, которые нужны для разворачивания образа (рис. 5, см. с. 68).

Интеграция модуля в систему мониторинга

Программный модуль расчёта индекса NDAI интегрирован в систему мониторинга MONITOR-RADAR (Попов и др., 2020, 2021). Система представлена тремя уровнями: BACKEND, MIDDLEWARE, FRONTEND. BACKEND-уровень содержит программную реализацию расчётов индекса и непосредственно Docker-образ (разделы «Предобработка данных» и «Контейнеризация модуля расчёта индекса»), представлен библиотекой на языках Java (предобработка-расчёт) и Python (построение RGB-схемы активности). То есть модуль NDAI интегрирован как Docker-образ, дополняющий уже существующие модули обработки радарных данных (расчёт скорости смещений методом постоянных отражателей и малых базовых линий).

```
docker service create -rm
  --entrypoint /opt/stamps_proc/bin/start.sh # Скрипт запуска расчёта
  --restart-condition=none
  --restart-max-attempts=0
  --mount type=bind,source=/mnt/satimg/Sentinel-1A,destination=/mnt/satimg
  --mount type=bind,source=/mnt/hdfs/user,destination=/mnt/public
  --name ndai_proc -d ndai_proc:1.0
  /mnt/output #Целевая директория
  /mnt/public/config #Путь к файлам настроечных параметров
  /opt/ndai_proc/graphs #Путь к файлам графов
  # Список радарных снимков
  /mnt/satimg/S1B_IW_SLC__1SDV_2020506T002757_2020506T002825_014366_01ABBB_71C4.zip,...
```

Рис. 6. Фрагмент команды запуска контейнера в системе Docker Swarm, выполняемой на стороне MIDDLEWARE-компонента

MIDDLEWARE-уровень реализован на базе объектов языка ES6. Имплементирует методы библиотеки NodeJS API. Функционирует как прокси-уровень между FRONTEND и BACKEND, выступает в качестве обработчика пользовательских HTTP-запросов для вызовов их методов. Для запуска расчётного задания NDAI-индекса на стороне BACKEND-компонента MIDDLEWARE использует объекты router и request, предоставляемые стандартной библиотекой Express API. Данные объекты транслируют POST-запросы со стороны FRONTEND-компонента в команды запуска Docker-контейнера (рис. 6). POST-запрос содержит настройки параметров среды Docker и NDAI-модуля.

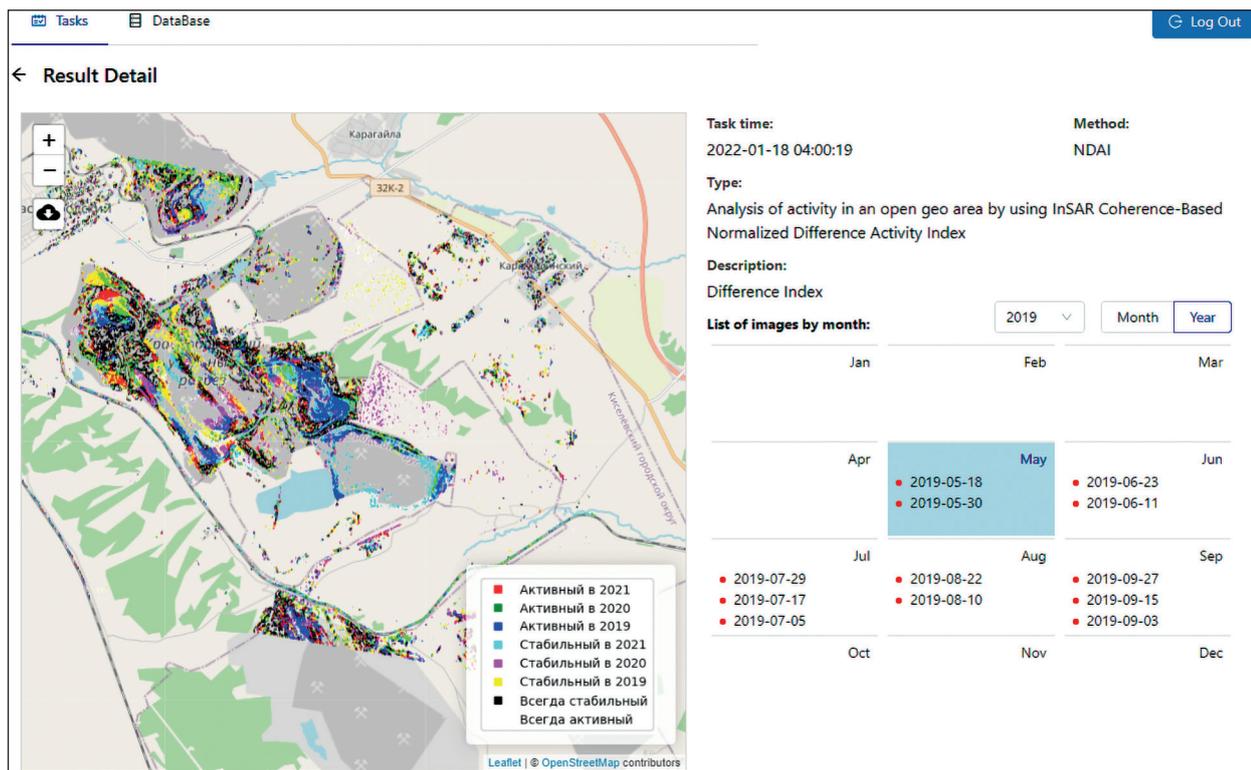


Рис. 7. Модуль отображения RGB-схемы результатов расчёта индекса NDAI

Команда содержит названия файловых директорий, которые отображаются (map) в контейнер в качестве локальных, тем самым связывая файловые системы хост-системы с операционной системой контейнера. Это позволяет контейнеру обращаться к любым смонтированным директориям как к локальным.

FRONTEND-уровень представлен программными объектами языка ES6, наследующими и расширяющими функциональные возможности типизированных классов React-библиотеки для создания пользовательских интерфейсов (<https://ru.reactjs.org/docs/getting-started.html>). Данные классы отвечают за графический интерфейс и взаимодействие с пользователями веб-приложения. В данном случае с модулем расчёта индекса NDAI.

Основные функции FRONTEND — подготовка входных данных, передача их на сторону MIDDLEWARE, инициализация удалённого запуска расчёта индекса NDAI посредством Docker Swarm и визуализация результатов в виде цветовой RGB-схемы (рис. 7) при взаимодействии с компонентами MIDDLEWARE через протокол HTTP.

В процессе интеграции модуля расчёта индекса был создан графический компонент (<http://84.237.62.135:8100/>), позволяющий задавать входящие параметры расчёта для основных этапов предобработки данных в полной схеме (см. рис. 1). Параметры могут быть выбраны вручную либо оставлены по умолчанию.

Апробация программного модуля

Данные, используемые в тесте модуля расчёта индекса NDAI, предоставлены открытым порталом Европейского космического агентства Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>). Тест проводился для зоны покрытия географической области в районе пос. Краснобродский, Россия, Кемеровская обл. Объект исследования — угольный разрез Краснобродский.

Была выбрана серия радарных изображений за трёхлетний период с интервалами 18.05.2019–03.09.2019, 12.05.2020–21.09.2020 и 19.05.2021–28.09.2021.

После первого этапа предобработки (TOPSSplit) каждое входное изображение было редуцировано до одной полосы (IW2, burst № 3), поляризация вертикальная (VV). Основные настроечные параметры базовых классов расчётных графов для этапов с 2 по 9 представлены в *таблице* (<https://github.com/senbox-org/s1tbx>).

Основные параметры расчёта индекса NDAI для базовых классов

Название базового класса S1TBX	Параметры
ApplyOrbitFile	orbitType: "Sentinel Restituted" (Auto Download) polyDegree: 3
BackGeocoding	demName: "SRTM 3Sec" demResamplingMethod: "BICUBIC_INTERPOLATION" resamplingType: "BISINC_5_POINT_INTERPOLATION"
Interferogram	srpPolynomialDegree: 5 srpNumberPoints: 501 orbitDegree: 3 cohWinRg: 6 cohWinAz: 2
GoldsteinPhaseFiltering	alpha: 1.0 FFTSizeString: 64 windowSizeString: 3 coherenceThreshold: 0.2
TerrainCorrection	demName: "SRTM 3Sec" imgResamplingMethod: "BILINEAR_INTERPOLATION" mapProjection: GEOGCS["WGS84(DD)", DATUM["WGS84", SPHEROID["WGS84", 6378137.0, 298.257223563]], PRIMEM["Greenwich", 0.0], UNIT["degree", 0.017453292519943295], AXIS["Geodetic longitude", EAST], AXIS["Geodetic latitude", NORTH]]
Subset	geoRegion: POLYGON((86.44 54.08, 86.44 54.15, 86.62 54.15, 86.62 54.08, 86.44 54.08))

Примечание: названия параметров даны, как они объявлены в программном коде базовых классов.

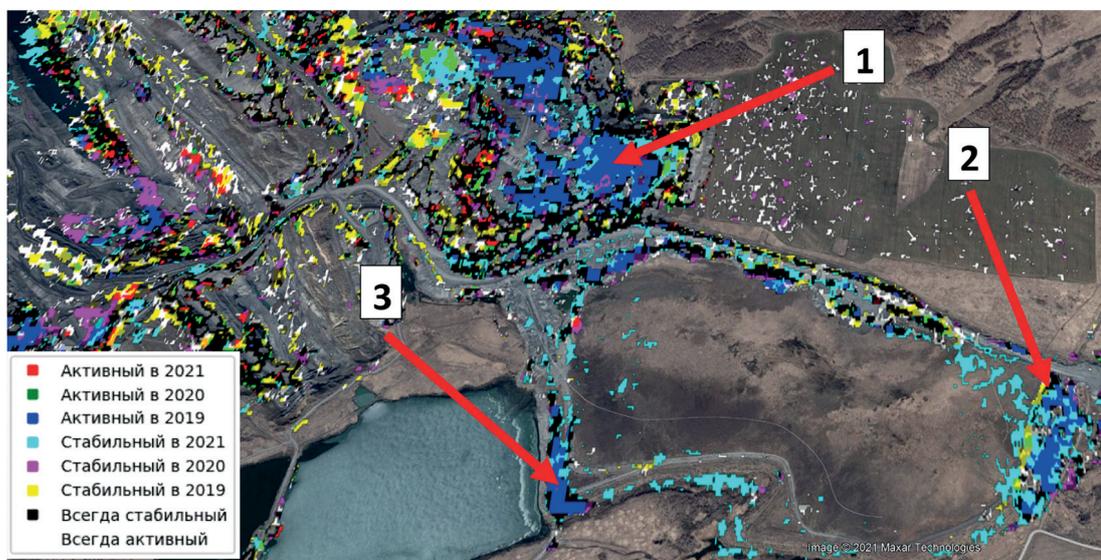


Рис. 8. Фрагмент RGB-схемы индекса NDAI. Россия, Кемеровская обл., южная часть разреза Краснобродский



а



б

Рис. 9. Россия, Кемеровская обл., южная часть разреза Краснобродский: а — апрель 2019 г.; б — май, 2021 г.

Полученный результат согласно схеме расчёта нормализованного индекса разностной активности NDAI представлен на рис. 8 (см. с. 71).

Согласно выполненному расчёту индекса NDAI показано, что в наблюдаемых зонах горных работ (см. рис. 8, зоны № 1–3) в период с апреля 2019 г. по май 2020 г. велось активное формирование земляных отвалов вдоль технических дорог (зоны № 2, 3) и на площадке (зона № 1). Это было подтверждено соответствующими ретроспективными снимками (рис. 9), полученными в сервисе Google Планета Земля (англ. Google Earth) с использованием временной шкалы.

Выводы

В результате исследования был разработан программный модуль для системы мониторинга активности горных работ в зонах подработки угольных разрезов на базе радарных данных, получаемых с космического аппарата Sentinel-1. Разработана схема предварительных этапов обработки серии интерферометрических снимков для расчёта индекса разностной активности. Индекс рассчитывался по усреднённым значениям когерентности временной серии радарных снимков за трёхлетний период.

Показано, что для открытых горных работ, где значения когерентности относительно высоки, есть устоявшиеся зоны (например, дороги, площадки). В то время как в области горных работ (взрывные работы, выемка грунта, отвалы), где фиксируются интенсивные изменения с короткими промежутками времени, когерентность значительно мала. Именно на таких контрастах формируются зоны временной разностной активности.

В качестве особенности программной реализации предлагаемого в работе решения продемонстрировано использование настраиваемых контейнеров с внутренними механизмами взаимодействия этапов расчётного алгоритма и объединения контейнеров в единый сценарий запуска для получения визуального представления индексов разностной активности в зависимости от настроечных параметров. Для каждого этапа построены графы расчёта в виде дескриптивных файлов в формате JSON и метаописаний в формате XML.

Дано описание организации вычислений и интеграции модуля NDAI в единую систему мониторинга. Показана трёхуровневая организация взаимодействия компонентов модуля с возможностью настройки, запуска и визуализации результатов в графическом интерфейсе пользователя.

На примере разреза Краснобродский (Россия, Кемеровская обл.) приведены результаты расчёта индекса разностной активности в сравнении с визуальным представлением исследуемой области. Показано, что получаемые в результате расчёта индекса RGB-схемы с высокой точностью идентифицируют значимые изменения грунта в зонах активных земляных работ на отвалах и технических дорогах угольного разреза.

Разработанный программный модуль может использоваться для мониторинга и анализа экологической ситуации в районах открытой добычи полезных ископаемых, природных и техногенных деформаций объектов жилой инфраструктуры вблизи зон подработки угольных предприятий.

Литература

1. Заушинцева А. В., Кожевников Н. В. Техногенез почвенного покрова в районах разработки угольных месторождений Кузбасса // Вестн. Кемеровского гос. ун-та. Сер.: Биологич., технич. науки и науки о Земле. 2017. № 1. С. 4–9.
2. Зеньков И. В. Дистанционное зондирование в решении экологических проблем лесной рекультивации на угольных карьерах Сибири // Вестн. Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2016. Т. 17. № 1. С. 36–44.
3. Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В. Спутниковый мониторинг природной среды при открытой разработке Олимпиадинского золоторудного месторождения // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
4. Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Миков Л. С. Массово-параллельный подход к обработке радарных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 49–61. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-49-61.
5. Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Юкина Н. И., Гиниятуллина О. Л., Миков Л. С., Харлампенков И. Е., Счастливцев Е. Л. Программный комплекс для расчета деформаций земной поверхности с использованием спутниковых радарных данных // Программная инженерия. 2021. № 5. С. 246–259. DOI: 10.17587/prin.12.246-259.
6. Chatterjee R., Lakhera R., Dadhwal V. InSAR coherence and phase information for mapping environmental indicators of opencast coal mining: A case study in Jharia Coalfield, Jharkhand, India // Canadian J. Remote Sensing. 2010. V. 36. P. 361–373. DOI: 10.5589/m10-047.

7. *Hartwig M. E., Paradella W. R., Mura J. C.* Detection and monitoring of surface motions in active open pit Iron mine in the Amazon region, using persistent scatterer interferometry with TerraSAR-X satellite data // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. P. 4719–4734. DOI: 10.3390/rs5094719.
8. *Julzarika A.* Mining land identification in Wetar Island using remote sensing data // *J. Degraded and Mining Lands Management*. 2018. V. 6. P. 1513–1518. DOI: 10.15243/jdmlm.2018.061.1513.
9. *Khalil R. Z., Saad-ul-Haque.* InSAR coherence-based land cover classification of Okara, Pakistan. Egypt // *Remote Sensing, Space Science*. 2018. V. 21. P. S23–S28. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.08.005.
10. *Kobayashi H., Watando H., Kakimoto M.* A global extent site-level analysis of land cover and protected area overlap with mining activities as an indicator of biodiversity pressure. // *J. Cleaner Production*. 2014. V. 84. P. 459–468. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.049.
11. *LaJeunesse C. K. J., Connette G., Bernd A., Phyo P., Aung K. H., Tun Y. L., Thein Z. M., Horning N., Leimgruber P., Songer M.* Assessment of mining extent and expansion in Myanmar based on freely-available satellite imagery // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. P. 912–924. DOI: 10.3390/rs8110912.
12. *Lee H.* Application of KOMPSAT-5 SAR Interferometry by using SNAP software // *Korean J. Remote Sensing*. 2017. V. 33. P. 1215–1221. DOI: 10.7780/kjrs.2017.33.6.3.5.
13. *Lobo F. D. L., Souza-Filho P. W. M., Novo E. M. L. d. M., Carlos F. M., Barbosa C. C. F.* Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017) // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. P. 1178–1192. DOI: 10.3390/rs10081178.
14. *Malmgren-Hansen D., Sohnesen T., Fisker P., Baez J.* Sentinel-1 change detection analysis for cyclone damage assessment in urban environments // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(15). P. 2409–2425. DOI: 10.3390/rs12152409.
15. *Mancini F., Grassi F., Cenni N.* A Workflow Based on SNAP–StaMPS Open-Source Tools and GNSS Data for PSI-Based Ground Deformation Using Dual-Orbit Sentinel-1 Data: Accuracy Assessment with Error Propagation Analysis // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 753–775. DOI: 10.3390/rs13040753.
16. *Moon J., Lee H.* Analysis of Activity in an Open-Pit Mine by Using InSAR Coherence-Based Normalized Difference Activity Index // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 1861–1886. DOI: 10.3390/rs13091861.
17. *Murguía D. I., Bringezu S., Schaldach R.* Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: Spatial distribution and implications for conservation // *J. Environmental Management*. 2016. V. 180. P. 409–420. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.040.
18. *Paradella W. R., Ferretti A., Mura J. C., Colombo D., Gama F. F., Tamburini A., Santosa A. R., Novali F., Galo M., Camargo P. O., Silva A. Q., Silva G. G., Silva A., Gomes L. L.* Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis // *Engineering Geology*. 2015. V. 193. P. 61–78. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.04.015.
19. *Ross M. R. V., McGlynn B. L., Bernhardt E. S.* Deep impact: Effects of mountain top mining on surface topography, bedrock structure, and downstream waters // *Environmental Science and Technology*. 2016. V. 50. P. 2064–2074. DOI: 10.1021/acs.est.5b04532.
20. *Wang Y., Guo Y., Hu S., Li Y., Wang J., Liu X., Wang L.* Ground Deformation Analysis Using InSAR and Backpropagation Prediction with Influencing Factors in Erhai Region, China // *Sustainability*. 2019. V. 11. P. 2853–2876. DOI: 10.3390/su11102853.
21. *Wang L., Yang L., Wang W., Chen B., Sun X.* Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 4485–4504. DOI: 10.3390/rs13214485.
22. *Wu Q., Song C., Liu K., Ke L.* Integration of TanDEM-X and SRTM DEMs and Spectral Imagery to Improve the Large-Scale Detection of Opencast Mining Areas // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. P. 1451–1471. DOI: 10.3390/rs12091451.

A software development approach for open pits monitoring based on Normalized Difference Activity Index and Sentinel-1 SAR data

S. E. Popov, V. P. Potapov, R. Yu. Zamaraev

*Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Novosibirsk 630090, Russia
E-mail: popov@ict.sbras.ru*

Intensive open pit mining may result in dramatic ground deformation over large areas. It leads to severe ecological and technogenic consequences. Therefore, it is extremely important to use remote monitoring to study various surface effects, particularly in inaccessible areas, where repeated observations are not available for a number of reasons (permanent mining work, quarry blasting etc.). In this study we propose new approaches to the high-loaded computing procedures development for Normalized Difference Activity Index (NDAI) calculation and the process of its integration into remote monitoring system. In our approach, the procedures are represented as a special structured graph formed as a JSON-file. Each element of the graph corresponds to a regular Java-class containing the implementation of the corresponding procedures due to Sentinel-1 API Toolbox library specifications. The graph is executed stage-wise inside a specific entity called a container in terms of Docker software platform. Each container encompasses a full software stack essential for the activity index calculation. We create a special “docker-compose” configuration file to operate the graph execution process inside the container. Thereby, containerization allows automating the deployment and integration process by abstracting and encapsulating interactions between the monitoring system and the module program code. In this work, we demonstrate a containerized module embedded into the interactive monitoring system, which is designed to run containers and to visualize the results as RGB composite schemes on online map services. The system is built on a three-layer component model (frontend, middleware and backend layers). It is available at <http://radarmon.ict.nsc.ru:8100>. For test purposes, we used Sentinel-1A/B InSAR datasets of coherence images to compute NDAI values for Krasnobrodsky open-pit mine area in Kemerovo region (Russia) for the period from April 2019 to May 2021. The obtained composite scheme revealed that active dump formation took place along technical roads and unused sites. These conclusions were confirmed by retrospective images from Google Earth.

Keywords: Normalized Difference Activity Index, radar interferometry, coherence, Sentinel-1, containerization

Accepted: 10.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-62-76

References

1. Zaushintsena A. V., Kozhevnikov N. V., Technogenesis of soil in coal mining areas of Kuzbass, *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Biologicheskie, tekhnicheskie nauki i nauki o Zemle*, 2017, No. 1, pp. 4–9 (in Russian).
2. Zenkov I. V., Remote sensing in the decision of environmental problems of forest remediation at coal strip mines in Siberia, *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademi-ka M. F. Reshetneva*, 2016, Vol. 17, No. 1, pp. 36–44 (in Russian).
3. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gorny V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Satellite monitoring of natural environment at olimpiada gold open-cut mine, *J. Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 160–166.
4. Popov S. E., Zamaraev R. Yu., Mikov L. S., Mass-parallel approach to radar data processing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 49–61 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-49-61.
5. Popov S. E., Zamaraev R. Yu., Yukina N. I., Giniyatullina O. L., Mikov L. S., Kharlampenkov I. E., Schastlivtsev E. L., Software for calculating deformations of the Earth surface using satellite radar data, *Programmnyaya inzheneriya*, 2021, No. 5, pp. 246–259 (in Russian), DOI: 10.17587/prin.12.246-259.
6. Chatterjee R., Lakhera R., Dadhwal V., InSAR coherence and phase information for mapping environmental indicators of opencast coal mining: A case study in Jharia Coalfield, Jharkhand, India, *Canadian J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 36, pp. 361–373, DOI: 10.5589/m10-047.
7. Hartwig M. E., Paradella W. R., Mura J. C., Detection and monitoring of surface motions in active open pit Iron mine in the Amazon region, using persistent scatterer interferometry with TerraSAR-X satellite data, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, pp. 4719–4734, DOI: 10.3390/rs5094719.

8. Julzarika A., Mining land identification in Wetar Island using remote sensing data, *J. Degraded and Mining Lands Management*, 2018, Vol. 6, pp. 1513–1518, DOI: 10.15243/jdmlm.2018.061.1513.
9. Khalil R. Z., Saad-ul-Haque, InSAR coherence-based land cover classification of Okara, Pakistan. Egypt, *Remote Sensing. Space Science*, 2018, Vol. 21, pp. S23–S28, DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.08.005.
10. Kobayashi H., Watando H., Kakimoto M., A global extent site-level analysis of land cover and protected area overlap with mining activities as an indicator of biodiversity pressure, *J. Cleaner Production*, 2014, Vol. 84, pp. 459–468, DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.049.
11. LaJeunesse C. K. J., Connette G., Bernd A., Phyo P., Aung K. H., Tun Y. L., Thein Z. M., Horning N., Leimgruber P., Songer M., Assessment of mining extent and expansion in Myanmar based on freely-available satellite imagery, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, pp. 912–924, DOI: 10.3390/rs8110912.
12. Lee H., Application of KOMPSAT-5 SAR Interferometry by using SNAP software, *Korean J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 33, pp. 1215–1221, DOI: 10.7780/kjrs.2017.33.6.3.5.
13. Lobo F. D. L., Souza-Filho P. W. M., Novo E. M. L. d. M., Carlos F. M., Barbosa C. C. F., Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI/Sentinel-2 Imagery (2017), *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, pp. 1178–1192, DOI: 10.3390/rs10081178.
14. Malmgren-Hansen D., Sohnesen T., Fisker P., Baez J., Sentinel-1 change detection analysis for cyclone damage assessment in urban environments, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(15), pp. 2409–2425, DOI: 10.3390/rs12152409.
15. Mancini F., Grassi F., Cenni N., A Workflow Based on SNAP–StaMPS Open-Source Tools and GNSS Data for PSI-Based Ground Deformation Using Dual-Orbit Sentinel-1 Data: Accuracy Assessment with Error Propagation Analysis, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, pp. 753–775, DOI: 10.3390/rs13040753.
16. Moon J., Lee H., Analysis of Activity in an Open-Pit Mine by Using InSAR Coherence-Based Normalized Difference Activity Index, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, pp. 1861–1886, DOI: 10.3390/rs13091861.
17. Murguía D. I., Bringezu S., Schaldach R., Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: Spatial distribution and implications for conservation, *J. Environmental Management*, 2016, Vol. 180, pp. 409–420, DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.040.
18. Paradella W. R., Ferretti A., Mura J. C., Colombo D., Gama F. F., Tamburini A., Santosa A. R., Novali F., Galo M., Camargo P. O., Silva A. Q., Silva G. G., Silva A., Gomes L. L., Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis, *Engineering Geology*, 2015, Vol. 193, pp. 61–78, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.04.015.
19. Ross M. R. V., McGlynn B. L., Bernhardt E. S., Deep impact: Effects of mountaintop mining on surface topography, bedrock structure, and downstream waters, *Environmental Science and Technology*, 2016, Vol. 50, pp. 2064–2074, DOI: 10.1021/acs.est.5b04532.
20. Wang Y., Guo Y., Hu S., Li Y., Wang J., Liu X., Wang L., Ground Deformation Analysis Using InSAR and Backpropagation Prediction with Influencing Factors in Erhai Region, China, *Sustainability*, 2019, Vol. 11, pp. 2853–2876, DOI: 10.3390/su11102853.
21. Wang L., Yang L., Wang W., Chen B., Sun X., Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, pp. 4485–4504, DOI: 10.3390/rs13214485.
22. Wu Q., Song C., Liu K., Ke L., Integration of TanDEM-X and SRTM DEMs and Spectral Imagery to Improve the Large-Scale Detection of Opencast Mining Areas, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, pp. 1451–1471, DOI: 10.3390/rs12091451.