

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Е. С. Данилов¹⁾, К. А. Скалозуб²⁾, А. Н. Марков³⁾

¹⁻³⁾ Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники,
Минск, Беларусь, ¹⁾ egord8066@gmail.com, ²⁾ kseniaskalozub6@gmail.com,
³⁾ a.n.markov@bsuir.by

В статье исследуется применение спутниковых данных для мониторинга климатических изменений. Рассмотрены ключевые методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включая мультиспектральную съемку, радиолокацию и лидарные технологии. Особое внимание уделено анализу долгосрочных климатических трендов, таких как изменение температуры поверхности, деградация ледников, динамика растительного покрова и повышение уровня моря. Исследуются современные алгоритмы обработки данных, включая машинное обучение и геопространственный анализ, а также их роль в повышении точности климатических моделей. Отдельно рассматриваются возможности открытых спутниковых платформ (Copernicus, NASA Earthdata, Google Earth Engine) для глобального мониторинга климата.

Ключевые слова: ДЗЗ (дистанционное зондирование Земли); Google Earth Engine; Copernicus; Sentinel-2; NASA EOS.

ANALYSIS OF SATELLITE DATA FOR CLIMATE CHANGE MONITORING

E. S. Danilov¹⁾, K. A. Skalozub²⁾, A. N. Markov³⁾

¹⁻³⁾ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus, ¹⁾ egord8066@gmail.com, ²⁾ kseniaskalozub6@gmail.com,
³⁾ a.n.markov@bsuir.by

The article explores the use of satellite data for monitoring climate change. The key methods of remote sensing are considered Remote sensing, including multispectral imaging, radar, and lidar technologies. Special attention is paid to the analysis of long-term climatic trends, such as changes in surface temperature, glacier degradation, vegetation dynamics and sea level rise. Modern data processing algorithms, including machine learning and geospatial analysis, are being investigated, as well as their role in improving the accuracy of climate models. The possibilities are considered separately open satellite platforms (Copernicus, NASA Earthdata, Google Earth Engine) for global climate monitoring.

Keywords: ERS (Earth Remote Sensing); Google Earth Engine; Copernicus; Sentinel-2; NASA EOS.

1. Введение

Современные климатические изменения представляют собой одну из наиболее актуальных глобальных проблем, оказывающих влияние на экосистемы, экономику и качество жизни населения. В связи с этим мониторинг климатических параметров и анализ их динамики приобретают ключевое значение для прогнозирования и адаптации к изменяющимся условиям. Традиционные методы наблюдений, основанные на наземных измерениях, обладают рядом ограничений, включая недостаточное пространственное покрытие и высокую стоимость развертывания инфраструктуры. В этой связи спутниковые технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся незаменимым инструментом для получения непрерывных, глобальных и высокоточных данных о состоянии атмосферы, гидросферы, криосферы и биосферы.

Развитие спутниковых систем, таких как Landsat, Sentinel, MODIS и других, в сочетании с современными методами обработки данных (машинное обучение, геопространственный анализ, облачные платформы типа Google Earth Engine) позволяет исследовать климатические изменения с беспрецедентной детализацией. Среди ключевых направлений мониторинга выделяются:

- анализ температурных аномалий поверхности суши и океана;
- оценка таяния ледников и полярных льдов;
- отслеживание динамики растительного покрова и деградации лесов;
- мониторинг уровня моря и его влияния на прибрежные зоны.

Интеграция спутниковых технологий с современными методами анализа данных, включая искусственный интеллект и облачные вычисления, создает принципиально новые возможности для оперативного выявления климатических аномалий и прогнозирования опасных явлений. Однако широкое внедрение этих технологий требует решения ряда методологических и технических задач, связанных с обеспечением точности, согласованности и интерпретируемости получаемых результатов.

Несмотря на значительные успехи в области спутникового мониторинга, остаются актуальными проблемы, связанные с точностью данных, их верификацией, а также интеграцией в климатические модели. В данной статье рассматриваются современные методы анализа спутниковых данных, их применение для оценки климатических изменений, а также перспективные направления развития технологий ДЗЗ в контексте глобального изменения климата.

2. Общие принципы спутникового мониторинга климата

Спутниковый мониторинг климата представляет собой комплексный подход к изучению глобальных климатических изменений с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Основу этого метода составляют орбитальные аппараты, оснащенные специализированными сенсорами, которые позволяют проводить многолетние наблюдения за различными климатическими параметрами с высокой точностью и глобальным охватом.

Ключевыми аспектами спутникового мониторинга являются спектральные характеристики измерений, пространственно-временное разрешение данных и их обязательная калибровка с наземными наблюдениями. Современные спутниковые системы способны отслеживать широкий спектр климатических показателей: температуру поверхности суши и океана, концентрацию парниковых газов в атмосфере, динамику ледового и снежного покрова, изменения уровня моря, а также состояние растительных экосистем. Эти данные получают с помощью различных типов датчиков – от оптических и инфракрасных сенсоров до радиолокационных и альтиметрических систем.

Главными преимуществами спутникового мониторинга являются его глобальная доступность (включая труднодоступные регионы), возможность построения длительных временных рядов наблюдений (некоторые архивы данных охватывают более 40 лет) и комплексность получаемой информации. Однако метод имеет и определенные ограничения, связанные с влиянием облачности на качество оптических измерений, необходимостью постоянной верификации данных и сложностями обработки больших массивов информации.

Современное развитие спутникового мониторинга связано с внедрением новых технологий, таких как миниатюрные спутниковые группировки, методы искусственного интеллекта для анализа данных, а также совершенствование систем межспутниковой калибровки. Ведущие космические программы, включая европейскую Copernicus и американскую NASA Earth Observing System, обеспечивают непрерывный поток климатически значимых данных, которые становятся основой для построения точных климатических моделей и разработки стратегий адаптации к глобальным изменениям климата. Перспективным направлением также является развитие квантовых сенсоров и когерентных методов обработки сигналов, которые позволят повысить точность измерений и снизить влияние помех при дистанционном зондировании Земли.

3. Методы обработки спутниковых данных

Современная обработка спутниковых данных включает несколько ключевых методов, каждый из которых решает определенные задачи анализа.

Предварительная обработка:

- радиометрическая коррекция – устранение искажений, вызванных датчиком и атмосферой;
- геометрическая коррекция – привязка снимков к координатной сетке;
- атмосферная коррекция – удаление влияния аэрозолей и водяного пара (алгоритмы DOS, FLAASH).

Классификация данных:

- контролируемые методы (максимального правдоподобия, опорных векторов);
- неконтролируемые методы (кластеризация K-средних, ISODATA);
- гибридные подходы с использованием машинного обучения.

Временной анализ:

- выявление изменений методами разностных изображений;
- анализ временных серий (гармонический анализ, метод Breaks For Additive Season and Trend - BFAST).

Спектральный анализ:

- расчет вегетационных индексов (NDVI, EVI, SAVI);
- гиперспектральные методы (выделение эндомемберов).

Радиолокационная обработка:

- интерферометрический анализ (InSAR) для измерения деформаций;
- поляриметрические методы классификации.

Интеграция с другими данными:

- слияние мультиспектральных и панхроматических данных (pansharpening);
- совместный анализ с наземными измерениями.

Современные платформы (Google Earth Engine, ENVI, QGIS) автоматизируют эти процессы, позволяя обрабатывать большие объемы данных для климатических исследований.

Современные методы обработки спутниковых данных активно развиваются с внедрением искусственного интеллекта, включая глубокое обучение для автоматической детекции объектов и прогнозирования динамики природных процессов.

4. Применение спутниковых данных для мониторинга климатических индикаторов

Современные спутниковые системы обеспечивают комплексный мониторинг ключевых климатических показателей на глобальном уровне. Мультиспектральные и инфракрасные сенсоры (MODIS, VIIRS, Landsat,

Sentinel-2) позволяют отслеживать динамику температуры поверхности суши и океана, выявлять тепловые аномалии и городские острова тепла. Для исследования криосферы используются радарные системы (Sentinel-1, CryoSat-2) и лазерная альтиметрия (ICESat-2), которые с высокой точностью фиксируют изменения ледяного покрова, скорость таяния ледников и динамику снежного покрова.

Особое значение имеет спутниковая альтиметрия (Jason-3, Sentinel-6), обеспечивающая мониторинг уровня Мирового океана с сантиметровой точностью. Спектрометры нового поколения (TROPOMI, OCO-2) позволяют анализировать состав атмосферы, включая концентрацию парниковых газов, аэрозолей и состояние озонового слоя. Мультиспектральные наблюдения дают возможность оценивать состояние растительного покрова через расчет различных индексов (NDVI, EVI) и отслеживать изменения в экосистемах.

Спутниковые системы демонстрируют особую эффективность при мониторинге экстремальных климатических явлений - ураганов, засух, лесных пожаров и наводнений. Ключевыми преимуществами космического мониторинга являются глобальный охват, включая труднодоступные регионы, высокая периодичность наблюдений и возможность построения длительных временных рядов данных (до 40 лет и более). Современные программы, такие как Copernicus и NASA EOS, обеспечивают непрерывный поток климатически значимых данных, которые интегрируются в климатические модели и используются для разработки стратегий адаптации к глобальным изменениям климата.

5. Применение новых технологий (ИИ, deep learning, big data) в анализе спутниковых данных

Современные технологии искусственного интеллекта и обработки больших данных революционизируют анализ спутниковой информации для климатического мониторинга. Машинное обучение, в частности глубокие нейронные сети, позволяет автоматизировать обработку огромных массивов спутниковых снимков, выделяя сложные климатические паттерны и аномалии, которые трудно обнаружить традиционными методами. Алгоритмы глубокого обучения (сверточные сети, U-Net архитектуры) эффективно решают задачи классификации земного покрова, детектирования изменений и прогнозирования климатических тенденций.

Облачные платформы, такие как Google Earth Engine и Microsoft Planetary Computer, предоставляют мощные инструменты для распределенной обработки петабайтов спутниковых данных, устраняя необходимость в локальном хранении информации. Технологии big data позволяют

интегрировать разнородные данные – от мультиспектральных снимков до климатических моделей и наземных наблюдений, создавая комплексные аналитические решения.

Особый прорыв связан с применением генеративных моделей (GAN) для восстановления пропусков в данных, вызванных облачностью, и улучшения пространственно-временного разрешения. Самообучающиеся системы на базе reinforcement learning начинают использоваться для оптимизации стратегий мониторинга и прогнозирования экстремальных климатических событий. Эти инновационные подходы значительно ускоряют обработку данных, повышают точность анализа и открывают новые возможности для понимания сложных климатических процессов в условиях быстро меняющейся окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. National Aeronautics and Space Administration (NASA) – обзор спутниковых миссий для климатических исследований.
URL: https://climate.nasa.gov/nasa_science/ (дата обращения: 11.06.2025).

2. ИИ в космосе, часть 1: Мониторинг Земли, управление спутниковыми системами и предсказательная аналитика.
URL: <https://maxpolyakov.com/ru/ii-v-kosmose-chast-1-monitoring-zemli-upravlenie-sputnikovymi-sistemami-i-predskazatel'naya-analitika/> (дата обращения: 11.06.2025).

3. Использование индикаторов для объяснения изменения климата политикам и населению. URL: <https://wmo.int/ru/media/magazine-article/ispolzovanie-indikatorov-dlya-obyasneniya-izmeneniya-klimata-politikam-i-naseleniyu> (дата обращения: 11.06.2025).

4. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900> (дата обращения: 11.06.2025).