

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра геоморфологии и геоэкологии

**Мониторинг землетрясений с использованием данных дистанционного
зондирования (на примере территории Японии)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы _____

направления 05.03.03 Картография и геоинформатика _____

географического факультета _____

Кузнецовой Софьи Алексеевны _____

Научный руководитель

старший преподаватель

должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой

к.с-х.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

В.В. Копнина

подпись, дата

инициалы, фамилия

В.А. Гусев

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение. В настоящее время, где сейсмическая активность представляет значительную угрозу для жизни людей, инфраструктуры и экономики, мониторинг землетрясений остаётся одной из наиболее актуальных и сложных задач сейсмологии. Несмотря на значительные достижения в изучении сейсмических процессов, точное предсказание времени, места и силы землетрясений всё ещё остаётся недостижимой целью. В последние годы особое внимание уделяется использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют выявлять косвенные признаки подготовки сейсмических событий, такие как облачные сейсмотектонические индикаторы (ОСТИ). Эти индикаторы, связанные с аномалиями в атмосфере, могут служить важным инструментом для повышения точности прогнозов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых методов прогнозирования землетрясений, которые могут минимизировать риски и повысить готовность к стихийным бедствиям, особенно в сейсмоактивных регионах, таких как Япония. Использование ОСТИ открывает перспективы для раннего обнаружения сейсмической активности, что особенно важно для стран с высокой плотностью населения и развитой инфраструктурой.

Цель работы: изучение и апробация методики мониторинга землетрясений на основе анализа облачных сейсмотектонических индикаторов и дополнительных параметров (тепловых и газовых) с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Задачи выпускной квалификационной работы:

-Изучить теоретические основы прогнозирования и мониторинга землетрясений, включая причины их возникновения и методы прогнозирования, в том числе метод на основе ОСТИ.

- Провести сбор, обработку и анализ спутниковых данных, данных с баз данных и сторонних источников (спутники: Terra, Aqua/MODIS; HIMAWARI-8; ERA-5; Sentinel-5P и т.д., USGS, JAXA и другие);

- Провести статистические анализы связи облачных аномалий с землетрясениями, а также дополнительных параметров облачных структур;
- Оценить точность применимости и надёжности данной методики.

1. Теоретические основы прогнозирования и мониторинга землетрясений

Землетрясение — это геофизический процесс, связанный с внезапным высвобождением накопленной упругой энергии в земной коре, вызванный относительным движением тектонических плит, разломов или вулканической активностью.

Механизмы возникновения землетрясений объясняют, как накопленная в земной коре энергия высвобождается в виде сейсмических волн. Эти процессы связаны с деформацией горных пород, их разрывом и движением вдоль разломов, что приводит к колебаниям земной поверхности. Основу составляет теория упругой отдачи, на которую до сих пор опираются большое количество сейсмологов, а также особенности разломов и типы сейсмических волн, определяющие характер и последствия землетрясений.

Мониторинг и прогнозирование землетрясений остаются одной из наиболее сложных задач современной географической науки, требующей междисциплинарного подхода, интеграции данных и применения передовых технологий из-за сложности формирования и образования землетрясений.

В зависимости от временного диапазона, методы мониторинга и прогнозирования можно классифицировать следующим образом:

- Краткосрочные прогнозы (часы-дни);
- Среднесрочные прогнозы (недели-месяцы);
- Долгосрочные прогнозы (годы–десятилетия);

По типу данных и области применения методы мониторинга и прогнозирования землетрясений делятся на следующие категории:

1. Геофизические методы;
2. Геохимические методы;
3. Статистические методы;

4. Геоинформационные системы (ГИС);
5. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) стало неотъемлемой частью современной сейсмологии, обеспечивая уникальные возможности для мониторинга тектонических процессов и прогнозирования землетрясений.

Основные виды методов ДЗЗ в сейсмологии:

1. Интерферометрия синтетической апертуры (InSar);
2. Тепловое зондирование;
3. Мониторинг ионосферы;
4. Гравитационное зондирование;
5. Оптическое зондирование.

Но наибольшее внимание уделяется новому методу прогнозирования с помощью ДЗЗ – облачные сеймотектонические индикаторы (ОСТИ). Этот метод основан на анализе аномальных облачных структур, которые могут формироваться над зонами активных разломов.

2. Облачные сеймотектонические индикаторы (ОСТИ): физические основы и методы выявления.

Облачные сеймотектонические индикаторы (ОСТИ) представляют собой аномальные облачные структуры, которые, согласно гипотезам, формируются в атмосфере над зонами активных тектонических разломов в период подготовки землетрясений.

Основой формирования ОСТИ является накопление тектонических напряжений в земной коре, которое происходит в зонах активных разломов. При достижении критического уровня напряжений в породах возникают микротрещины, что приводит к дегазации.

Выделяющиеся газы изменяют физико-химические свойства приземного слоя атмосферы. Например, радон, будучи радиоактивным газом, способствует ионизации молекул воздуха, увеличивая концентрацию ионов и аэрозолей. Этот процесс, известный как ионизационный эффект, снижает

удельное электрическое сопротивление атмосферы и может вызывать локальные изменения электрического поля.

Тектонические напряжения также сопровождаются выделением тепла из-за трения пород в зонах разломов и пьезоэлектрических эффектов. Пьезоэлектричество возникает в кварцсодержащих породах под действием механического напряжения, что приводит к генерации электрических зарядов и локальному нагреву.

Нагрев приземного слоя атмосферы инициирует конвективные процессы, при которых теплый воздух поднимается, вызывая турбулентные потоки. Эти потоки способствуют конденсации водяного пара, формируя линейные или полосовидные облачные структуры, характерные для ОСТИ.

Стоит отметить также ещё один процесс – гидрологический. Выделение газов и тепловых потоков вблизи разломов изменяет гидростатическое давление в грунтовых водах, что может приводить к выбросу паров воды в атмосферу.

ОСТИ характеризуются специфическими морфологическими особенностями, которые отличают их от типичных метеорологических облачных образований. **Основные формы ОСТИ включают:**

1. Линейные облачные структуры;
2. Параллельные полосы;
3. Волнообразные формы;
4. Квадраты (или прямоугольные формы);
5. Дыры (облачные разрывы);
6. Кольцевые или радиальные структуры;

Все данные формы объединяет важный признак - аномальная устойчивость. В отличие от метеорологических облаков, которые быстро меняют форму под воздействием ветра и турбулентности, ОСТИ демонстрируют высокую устойчивость.

Основных признаки облачных индикаторов, которые можно выявить с помощью данных ДЗЗ:

1. Высокая оптическая плотность;
2. Тепловые аномалии;
3. Ионизационные эффекты;
4. Пространственная корреляция с разломами.

Но все облачные структуры, наблюдаемые над сейсмоактивными регионами, являются ОСТИ. **Основные отличия ОСТИ от метеорологических облаков заключаются в следующем:**

1. Метеорологический контекст - обычные облака формируются под воздействием атмосферных процессов;

2. Пространственная и временная специфика - метеорологические облака обычно распределены хаотично или связаны с крупномасштабными погодными системами;

3. Спектральные характеристики - на спутниковых изображениях ОСТИ выделяются высокой отражательной способностью в видимом диапазоне и аномальной температурой;

4. Устойчивость и морфология - метеорологические облака подвержены быстрому рассеянию под воздействием ветра, тогда как ОСТИ сохраняют форму благодаря постоянному источнику энергии.

Для мониторинга ОСТИ применяются спутники, предоставляющие данные в различных спектральных диапазонах и с высоким пространственно-временным разрешением. **Основные спутниковые системы включают:**

1. MODIS (Aqua, Terra);
2. Himawari-8 (JMA);
3. NOAA-20/21 (NOAA);
4. Suomi NPP (NOAA);
5. Swarm (ESA);

Выявление ОСТИ на основе данных ДЗЗ требует применения специализированных методов обработки изображений и интеграции с (ГИС).

Основные подходы включают:

- Морфологический анализ;

- Спектральный анализ;
- Тепловой анализ;
- Ионосферный анализ;
- Искусственный интеллект.

Впоследствии, данные ДЗЗ, используемые для выявления ОСТИ.

3. Практическое применение ОСТИ в прогнозировании землетрясений.

Разработка методики прогнозирования землетрясений на основе ОСТИ направлена на создание систематического подхода к выявлению, анализу и интерпретации этих индикаторов для повышения точности и своевременности прогнозов сейсмической активности.

Для изучения облачных сейсмотектонических индикаторов (ОСТИ) в прогнозировании землетрясений была выбрана территория Японии, где проанализированы сейсмические события 20 декабря 2020 года (M6.3), 13 февраля 2021 года (M7.1), 16 марта 2022 года (M7.3), 1 января 2024 года (M7.5) и 2 апреля 2025 года (M6.2).

Разработанная методика включает следующие этапы:

1. Сбор данных со спутников и других источников. Используются снимки с геостационарных спутников и низкоорбитальных платформ. Эти спутники предоставляют данные в видимом, инфракрасном и тепловом диапазонах, что позволяет выявлять облачные аномалии

Данные собираются во временном промежутке за 14 дней до дня события (ЗМТ, 0 дня). По итогу данного этапа было проанализировано более 150 снимков по всем землетрясениям, впоследствии чего были отобраны нужные снимки, которые были интегрированы в QGIS, где были привязаны и в некоторых случаях подвергались проверке.

Также проводился сбор и анализ данных также проводился с баз данных (USGS, JMA и т.д.) и сторонних источников – по этим данным создавалась общая карта сейсмической активности и карты отдельно по каждому событию.

2. Выявление и сопоставление ОСТИ. Основное внимание уделяется линейным облачным структурам (ЛОА) или провалам в облачности, не связанным с метеорологическими фронтами, циклонами или другими атмосферными явлениями. Протяженность ОСТИ варьируется от десятков до тысячи километров.

Выделение ОСТИ происходило относительно активных тектонических разломов, мною были использованы базы данных сейсмической активности (USGS, JMA).

Для более точного выделения ОСТИ сопоставлялись с данными о погодных условиях и дополнительными параметрами.

Впоследствии выявления ОСТИ, в некоторых случаях использовалась зависимость между протяжённостью ОСТИ и магнитудой землетрясения:

$$M = \ln L \approx \pm 0.3,$$

где M - магнитуда, L – протяжённость ОСТИ в километрах.

3. Интеграция с другими методами и точность прогнозирования. Как было сказано ранее, мною были также собраны дополнительные параметры – тепловые изменения, или температура верхнего слоя облаков, а также дегазация Rn и CH_4 .

По итогу собранных данных была корреляционная обработка данных - она продемонстрировала связи между самими облачными индикаторами, параметрами (тепловыми) облаков и уровнем дегазации газов (радона и метана).

Сейсмическая активность за период 2020-2025 года.

1. 20 декабря 2020 года (M6.3, Хатинохэ, префектура Ибараки)

Первые ОСТИ зафиксированы 6 декабря (ЛОА протяжённостью 3500 км и 2352 км, расчётная магнитуда 7.7–8.2). 12 декабря наблюдались ЛОА длиной 544 км и 542 км ($M_{6.3 \pm 0.3}$), совпадающие с фактической магнитудой. 18–19 декабря отмечены структуры вдоль Окинавской и Филиппинской плит, включая четырёхугольный разрыв. Частота появления ОСТИ — 42.86% (6 из 14 дней). Температура облаков повышалась до $+4.0^\circ\text{C}$ за день до

землетрясения, с пиком дегазации радона (98 Бк/м³, +98%) и метана (4 ppm, +100%) в день события.

2. 13 февраля 2021 года (M7.1, Фукусима)

Аномалии начались 29 января с перистых облаков, 30 января — «дыра» в облачности (813 км, M6.7±0.3). 10–11 февраля фиксировались ЛОА (350 км, M5.9±0.3) и кучево-перистые облака. В день землетрясения появились четырёхугольные структуры. Частота ОСТИ — 42.86% (6 из 14 дней). Температура облаков достигла +4.5°C за день до события, дегазация радона и метана — 97–99% от среднего в день землетрясения.

3. 16 марта 2022 года (M7.3, Фукусима)

ОСТИ фиксировались с 2 марта (1205.5 км, M7.1±0.3). 5 марта — ЛОА 806 км и 767 км (M6.6–6.7). 15 марта за сутки до землетрясения — ЛОА 1388 км и 1352 км (M7.2±0.3). Частота ОСТИ — 36% (5 из 14 дней). Температура облаков достигла пика +6.0°C в день события, дегазация радона (+99%) и метана (+99%) была максимальной.

4. 1 января 2024 года (M7.5, полуостров Ното)

ОСТИ начались 11 декабря (740 км, M6.6±0.3), 22 декабря — структуры 2120 км (M7.7±0.3). 31 декабря — ЛОА 2264 км (M7.7±0.3). Частота ОСТИ — 29%. Температура облаков повышалась до +5.1°C в день землетрясения, дегазация радона (+97%) и метана (+100%) достигла пика.

5. 2 апреля 2025 года (M6.2, Кюсю)

ОСТИ зафиксированы 24 марта (трассеры M6–7.8). 25–28 марта — ЛОА 465–723 км (M6.1–6.6). 1–2 апреля — ЛОА 528 км (M6.3±0.3), совпадающая с фактической магнитудой. Частота ОСТИ — 43%. Температура облаков достигла +5.2°C в день события, дегазация радона (+98%) и метана (+97%) была высокой.

Дальше было проведено выявление зависимостей и оценка точности метода. Анализ показал, что ОСТИ фиксировались в среднем в 40% случаев за 14 дней, с учащением за 9, 6 и 3 дня до землетрясения. Взаимосвязь между ОСТИ и днями до события слабая (Пирсон: -0.1...0.35). Связь температуры

облаков с ОСТИ отрицательная, но если анализ проводился относительно интервала времени, то с приближением к землетрясению в трёх случаях наблюдалась сильная положительная связь. Дегазация радона и метана возрастала перед событием, но интерпретация сложна из-за влияния внешних факторов.

По итогу была проведена оценка точности применимости и надёжности метода. Из положительных моментов данной методики было выявлено: комплексная обработка данных, интеграция тепловых и газовых параметров, высокая научная ценность, сочетание нескольких дисциплин и перспективные через машинное обучение. Из отрицательных же: неточность формулы магнитуды, влияние метеоусловий, сложность интерпретации дегазации, необходимость большей выборки и стандартизации критериев ОСТИ.

Методика демонстрирует потенциал для краткосрочного прогнозирования, но требует доработки для повышения точности и учёта внешних факторов.

Заключение. Метод на основе облачных сеймотектонических индикаторов (ОСТИ) представляет собой инновационный подход к прогнозированию землетрясений, основанный на выявлении атмосферных аномалий с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Его дальнейшее развитие открывает значительные перспективы для повышения точности и оперативности сейсмического мониторинга, особенно в условиях ограниченности традиционных методов.

Выполненные задачи позволили подтвердить перспективность использования ОСТИ в мониторинге и прогнозировании землетрясений, особенно в сейсмоактивных регионах, таких как Япония. Полученные результаты подчёркивают важность комплексного подхода, включающего интеграцию данных ДЗЗ с другими методами мониторинга, и указывают на необходимость дальнейших исследований для повышения точности и оперативности прогнозов.

Таким образом, данная методика может стать основой для создания более эффективных систем предупреждения о землетрясениях, что имеет ключевое значение для минимизации рисков и обеспечения безопасности населения в сейсмоопасных регионах. В перспективе развитие метода ОСТИ, включая автоматизацию анализа с помощью машинного обучения и расширение спутниковых наблюдений, может значительно повысить его вклад в глобальную систему сейсмического мониторинга.

Список использованных источников

- 1 Болт Б. Землетрясения / Б. Болт – М. :Мир, 1981. – 256 с.
- 2 Валяев, Б.М., А.Н. Дмитриевский Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь / Б.М. Валяев – М. : ГЕОС, 2010. – 712 с.
- 3 Типы областей континентальной коллизии [Электронный ресурс]: poznauka.org – URL: <https://poznayka.org/s74951t1.html> (дата обращения 20.03.2025) – Загл. с экрана. --Яз. рус.
- 4 Хмелевский, В.К. Геофизика / В.К. Хмелевский – М. : КДУ, 2007. – 320 с.
- 5 Глоссарий. Эндогенные процессы [Электронный ресурс]: sfedu.ru – URL: https://www.popovgeo.sfedu.ru/glossary_endogenous (дата обращения: 21.03.2025). – Загл. с экрана. --Яз. рус.
- 6 Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы [Электронный ресурс]: imgg.ru – URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2022-3-1.pdf> (дата обращения: 22.03.2025). – Загл. с экрана. --Яз. рус.
- 7 Детальная модель поверхности разрыва Турецких землетрясений 2023 г. по спутниковым данным [Электронный ресурс]: ifz.ru – URL: <https://ifz.ru/nauka/vazhnejshie-rezultaty-i-issledovaniy/detalnaya-model-poverxnosti-razryiva-tureczkix-zemletryasenij-2023-g-po-sputnikovyim-dannyim> (дата обращения: 23.03.2025). – Загл. с экрана. --Яз. рус.

8 Coarse-graining research of the thermal infrared anomalies before earthquakes in the Sichuan area on Google Earth engine [Электронный ресурс]: frontiersin.org

– URL: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2023.1101165/full> (дата обращения: 23.03.2025). – Загл. с экрана. —Яз. англ.

9 Температурные аномалии перед землетрясением в провинции Горкха (Непал) в 2015 г. , установленные по значениям температуры поверхности Земли MODIS и уходящего длинноволнового излучения [Электронный ресурс]: cyberleninka.ru – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/temperaturnye-anomalii-pered-zemletryaseniem-v-provintsii-gorkha-nepal-v-2015-g-ustanovlennye-po-znacheniyam-temperaturey-poverhnosti>

(дата обращения: 23.03.2025). – Загл. с экрана. —Яз. рус.

10 Ионосферные и аэроэлектрические аномалии перед камчатским землетрясением 30.01.2016 [Электронный ресурс]: emsd.ru. – URL: https://www.emsd.ru/static/library/2017_conf/060.pdf (дата обращения: 24.03.2025). – Загл. с экрана. —Яз. рус.

11 Использовании ДЗЗ для прогнозирования землетрясений [Электронный ресурс]: cyberleninka.ru – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dlya-prognozirovaniya-zemletryaseniya> (дата обращения: 25.03.2025). – Загл. с экрана. —Яз. рус.

12 Облака – предвестники землетрясений [Электронный ресурс]: scfh.ru URL: <https://scfh.ru/papers/oblaka-predvestniki-zemletryaseniya/> (дата обращения 25.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

13 Сидорин, А.Я., Предвестники землетрясений / А.Я. Сидорин – М.: Наука, 1992. 192 с.

14 Можно ли предсказать землетрясение по облакам? [Электронный ресурс]: factcheck.kz URL: <https://factcheck.kz/nauka/mozhno-li-predskazat-zemletryaseniye-po-oblakam/> (дата обращения 25.03.2025). – Загл. с экрана. – Яз. рус.