

**ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

**Цидилина М. Н. , Ефремычева (Гапонова) Е. В., Воронова О. С.**

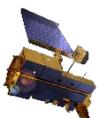
**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО  
РЕГИОНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
РАЗЛИЧНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ  
ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-  
исследовательский институт аэрокосмического мониторинга  
"АЭРОКОСМОС"**

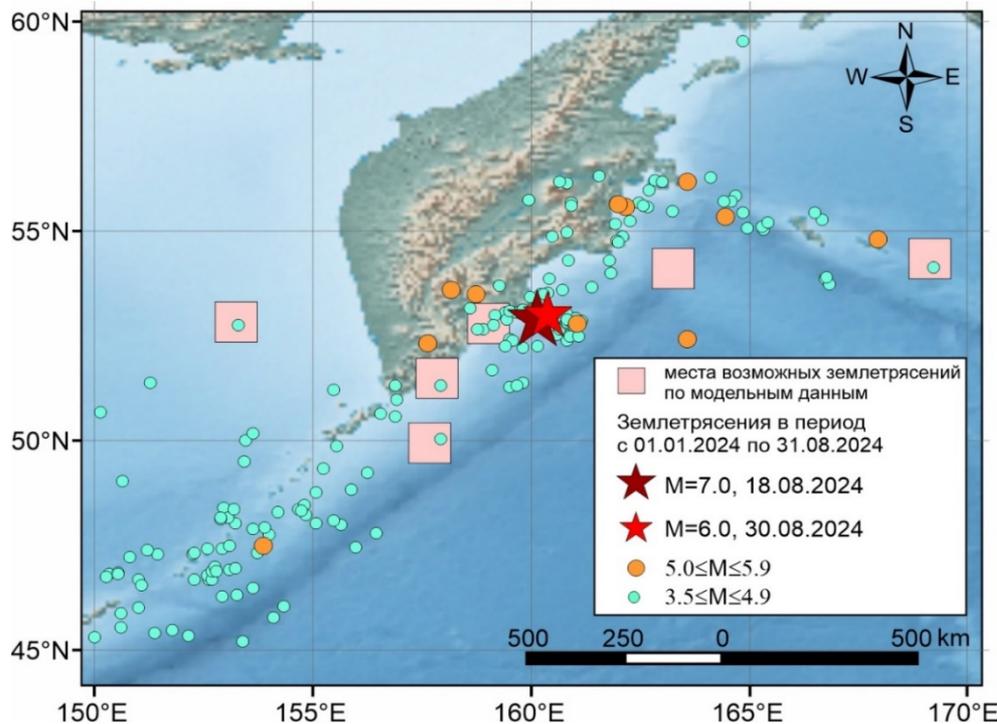
**Россия, г.Москва, Гороховский пер., д.4, 105064**

**Тел.: 632-16-54, тел./факс: 632-11-78; E-mail:**

**office@aerocosmos.info**



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН МАКСИМАЛЬНОГО РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА



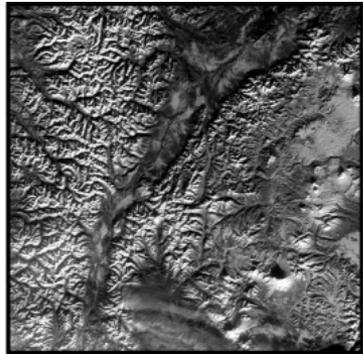
В настоящей работе с использованием модели машинного обучения Случайный лес (Random forest) определялись зоны максимального риска возникновения сейсмических событий. Модель Случайный лес представляет собой алгоритм машинного обучения, который используется как для задач классификации, так и для задач регрессии. Это ансамблевый метод обучения, который объединяет несколько деревьев решений для создания более точной и надежной модели. Для обучения модели были использованы исторические данные о землетрясениях (с 1949 г.) в сейсмоопасном регионе полуострова Камчатки и Курильских островов. Для выбранной модели были протестированы гиперпараметры с использованием различных метрик, и получены результаты с зонами максимального риска возникновения сейсмических событий.

**В результате были выявлены зоны максимального риска сильных землетрясений, для которых проводился непрерывный космический мониторинг одновременно нескольких прогностических параметров (изменения систем линеаментов, температуры поверхности (SST), уходящего длинноволнового излучения (OLR), а также полного электронного содержания ионосферы (TEC)). В процессе проведения непрерывного мониторинга произошло сильное землетрясение у восточного побережья Камчатки 18 августа 2024 г. с M=7.0, эпицентр которого располагался вблизи одной из выявленных зон максимального риска.**

# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ



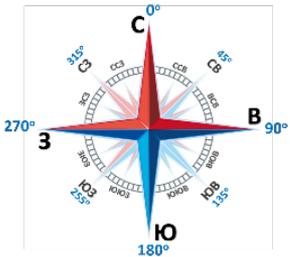
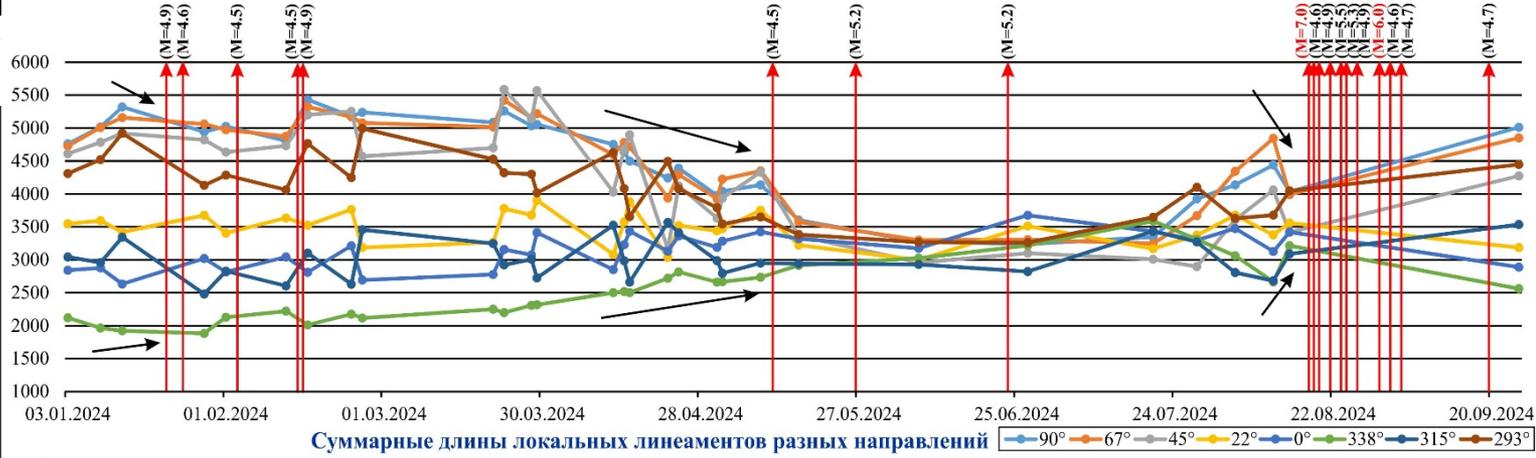
Расположение тестового участка и эпицентры землетрясений ( $M \geq 6$ ), произошедших в августе 2024 года

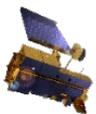


Фрагмент космического изображения исследуемого тестового участка

С использованием космических изображений, полученных со спутника Terra (MODIS) проведен космический мониторинг Камчатки с января 2024 года. Исследуемый фрагмент 200\*200 км захватывает южную часть Восточного хребта. Регион является достаточно сложным для изучения линеаментных систем из-за повышенной облачности. На графике суммарных длин локальных линеаментов за период с 03.01.2024г. по 05.10.2024г. видно, что их аномалии проявляются в постепенном росте (или убывании) их значений при приближении к моменту появления сейсмических событий.

Общая тенденция увеличения суммарных (осредненных) длин штрихов характерна для направлений  $0^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $315^\circ$ ,  $338^\circ$ , то есть штрихи поперечные к основным морфоструктурам региона (зоны растяжения земной коры). Общая тенденция уменьшения суммарных (осредненных) длин штрихов проявляется для направлений  $45^\circ$ ,  $67^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $293^\circ$ , то есть штрихи совпадающие с расположением основных морфоструктур региона (зоны сжатия земной коры).



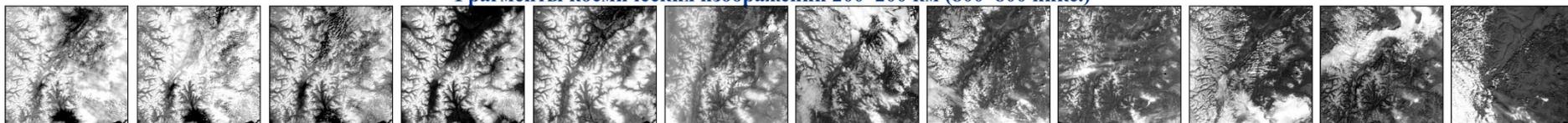


# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (M>6), ПРОИЗОШЕДШИХ В АВГУСТЕ 2024 Г.

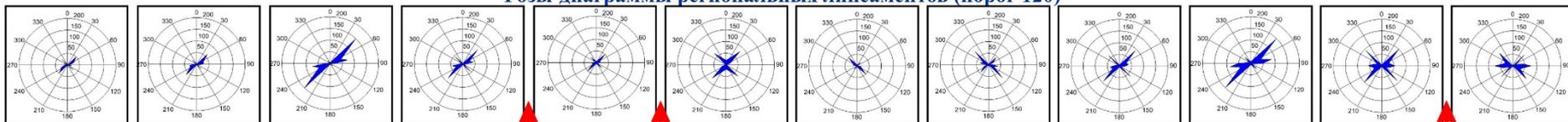


По степени выраженности морфоструктур в рельефе преобладают элементы СВ (45°) систем линеаментов. На схеме (9.05.2024г.) видно, что за 18 дней до землетрясения, произошедшего 27.05.2024г. (M=5.2) максимально увеличиваются СВ направления линеаментов. Примерно за 2 месяца (27.06.24г.) до землетрясения, произошедшего 18.08.2024г. (M=7.0) возрастают лучи СЗ (315°) направления роз-диаграмм региональных линеаментов. 11.08.2024г. (за 7 дней до землетрясения (M=7.0) 18.08.2024г. и за 19 дней до землетрясения (M=6.0) 30.08.24) наблюдается максимальное увеличение СВ и субширотных направлений. На схеме 14.08.2024г. (за 4 дня до землетрясения 18.08.2024г. (M=7.0) и за 16 дней до 30.08.24 (M=6.0)) зафиксирован максимальный рост лучей роз-диаграмм (315°) секущих направлений региональных линеаментов по отношению к основным направлениям исследуемого региона.

Фрагменты космических изображений 200\*200 км (800\*800 пикс.)



Розы-диаграммы региональных линеаментов (порог 120)

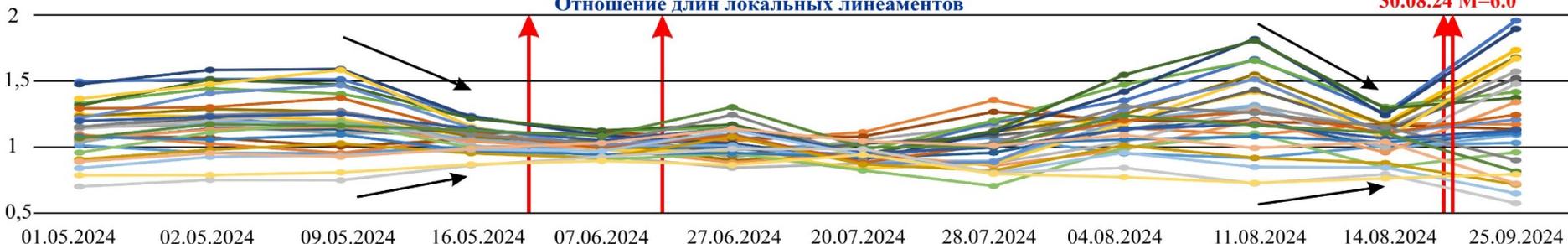


01.05.2024 02.05.2024 09.05.2024 16.05.2024 07.06.2024 27.06.2024 20.07.2024 28.07.2024 04.08.2024 11.08.2024 14.08.2024 25.09.2024

27.05.24 M=5.2 23.06.24 M=5.2

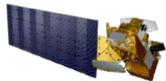
18.08.24 M=7.0 30.08.24 M=6.0

Отношение длин локальных линеаментов

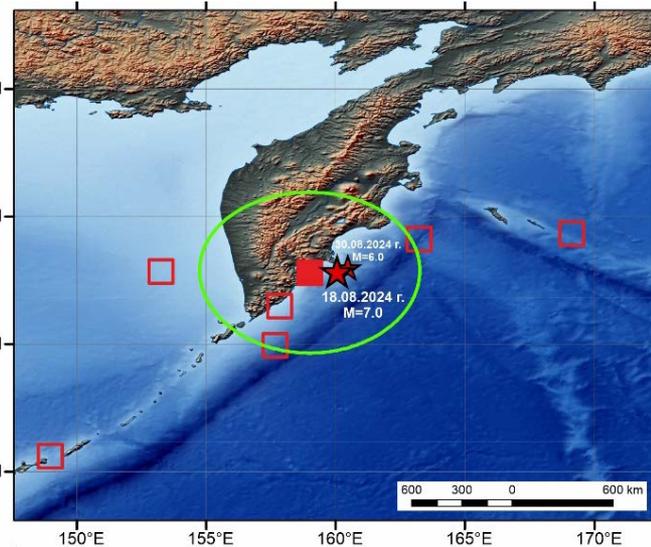
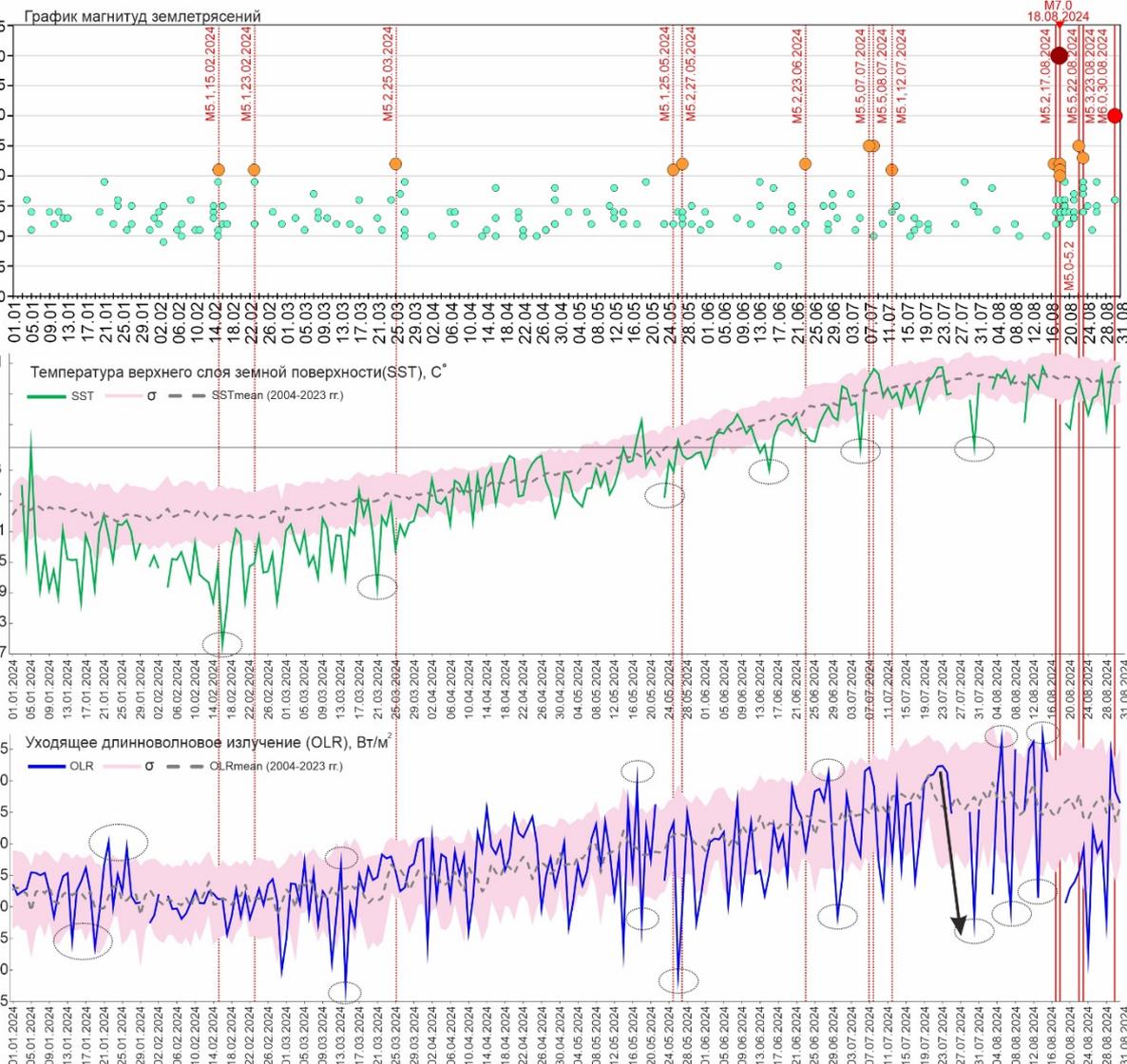


— L90°/L67° — L90°/L45° — L90°/L22° — L90°/L0° — L90°/L338° — L90°/L315° — L90°/L293° — L67°/L45° — L67°/L22° — L67°/L0° — L22°/L315° — L22°/L293° — L338°/L293° — L315°/L293° — L67°/L338° — L67°/L315° — L67°/L293° — L45°/L22° — L45°/L0° — L45°/L338° — L45°/L315° — L45°/L293° — L22°/L0° — L22°/L338° — L0°/L315° — L0°/L293° — L338°/L315° — L0°/L338°

На графиках изменения относительных длин локальных линеаментов разных направлений видно, что их величины начинали расти или уменьшаться по мере приближения сейсмических событий, достигая пиков 09.05.2024г. (за 18 дней до землетрясения (M=5.2) 27.05.2024г.) и 11.08.2024г. (за 7 дня до землетрясения (M=7.0) 18.08.2024г. и за 19 дней до землетрясения (M=6.0) 30.08.24).



# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНЕ РИСКА СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА С 01 ЯНВАРЯ ПО 31 АВГУСТА 2024 Г.



- ★ эпицентры землетрясений 17.08.2024г., M=7 и 30.08.2024г., M=6
- зоны максимального риска возникновения сейсмических событий M>6
- исследуемая зона максимального риска возникновения землетрясений M>6
- выбранная область мониторинга с 1 января 2024 г.

**Анализ изменений температуры земной поверхности позволил выявить аномалии:**

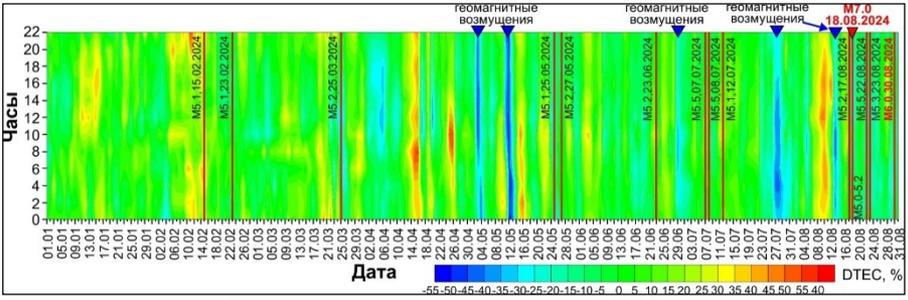
- перед землетрясениями с магнитудами от 5 зафиксированы аномальные снижения на 7-13°C;
- 30 июля 2024 г. выявлено понижение значений на 10 °С.

**Анализ изменений уходящего длинноволнового излучения позволил выявить аномалии:**

- перед землетрясениями с магнитудами от 5 наблюдалось снижение значений на 60-85 Вт/м²;
- с 30 июля 2024 г. наблюдались резкие понижения и повышения значений на 70-80 Вт/м².

**Перед главным сейсмическим событием 18 августа 2024 г. (за 19 дней до землетрясения), выявлены аномальные изменения параметров такие как понижение SST и значений OLR.**

# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЗОНЕ РИСКА СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА С 01 ЯНВАРЯ ПО 31 АВГУСТА 2024 Г.



Двумерное распределение DTEC



График изменений геомагнитного индекса Dst

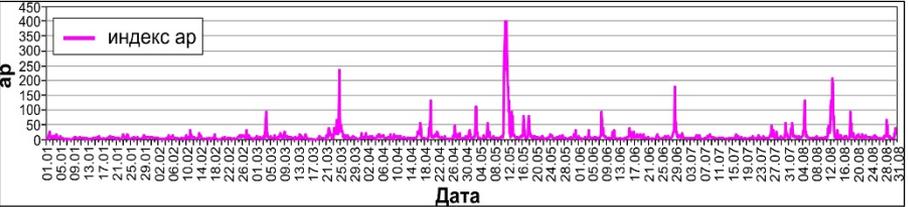


График изменений геомагнитного индекса ap

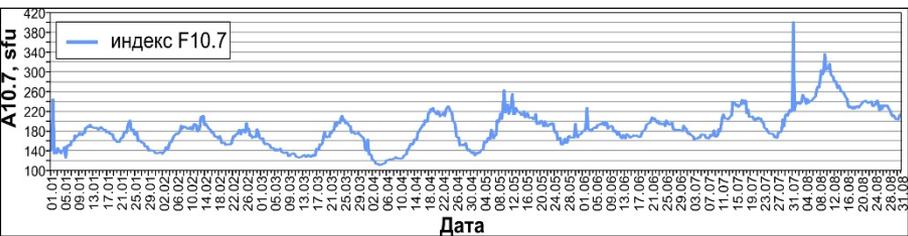


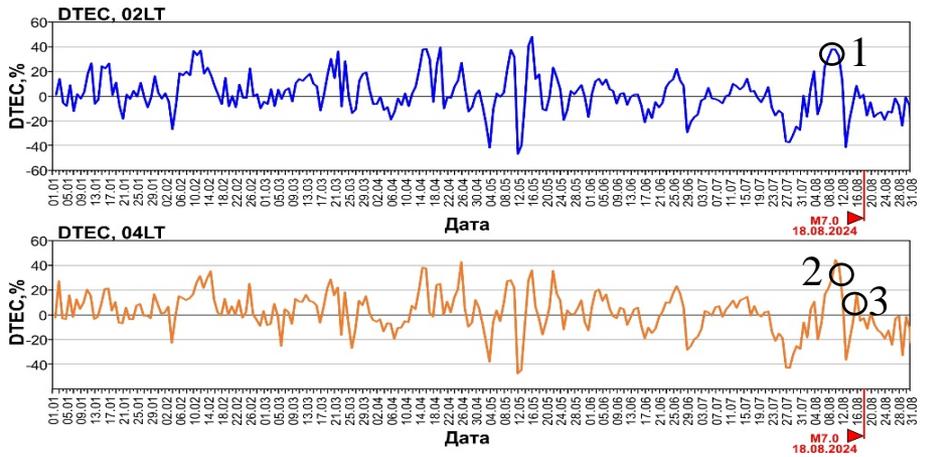
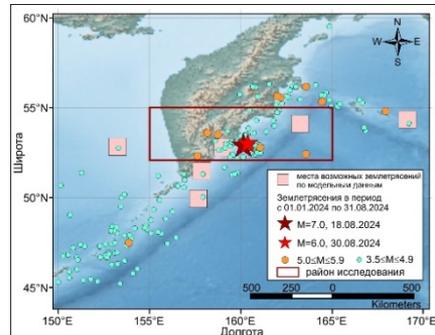
График изменений индекса солнечной активности F10.7

Положительные аномалии DTEC (более 20%) были выявлены: за 3-4 дня до землетрясения 15.02.2024 (M5.1), за 3 и 5 дней до землетрясения 25.03.2024 (M5.2), за 2-3 дня до землетрясения 25.05.2024 (M5.1), за 4-5 дней до землетрясения 27.05.2024 (M5.2), за 5-9 дней до серии землетрясений 17-18.08.2024 г. (M5.0-7.0), за 2 дня до землетрясения 30.08.2024 (M6.0).

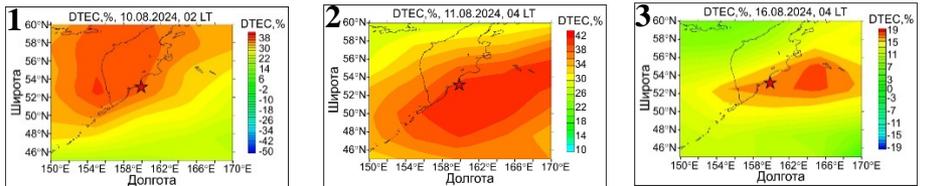
В период подготовки серии землетрясений 17-18.08.2024 г. (M5.0-7.0) были зарегистрированы также геомагнитные возмущения (13.08.2024 г. Dst= -188nT, ap=207) и высокая солнечная активность (09.08.2024 г. F10.7=336 sfu).

Проведены исследования DTEC в выбранном районе (см. карту):  
 $DTEC = ((TEC - MTEC) / MTEC) * 100 \%$ ,  
 где TEC – полное электронное содержание на текущий день, MTEC – медиана, рассчитываемая скользящим окном за 10 предшествующих суток.

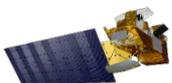
Выявлены отрицательные аномалии DTEC 4 и 25 марта, 17 и 20 апреля, 3 и 11 мая, 29 июня, 28 июля, 5 и 13 августа 2024 г. В эти дни были зарегистрированы геомагнитные возмущения (Dst=-112nT, -128nT, -65nT, -117nT, 96nT, -412nT, -105nT, -101nT, -188nT соответственно).



Временные ряды DTEC для 2 часов и 4 часов местного времени



Локальные аномалии DTEC в период подготовки серии землетрясений 17-18.08.2024 г. (M5.0-7.0)



# АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Анализ многолетних временных рядов тепловых полей и полного электронного содержания (ТЕС) осуществлялся с использованием методов машинного обучения. Для обнаружения аномалий была проведена нормализация данных исследуемых параметров.

Анализ временных рядов проводился с использованием двух типов моделей LSTM (долгая краткосрочная память) и автоэнкодера. Применение кросс-валидации и рекуррентной нейронной сети LSTM позволило обучить модель на временных рядах и выявить необходимые зависимости. Использование автоэнкодеров (нейронная сеть, которая обучается восстанавливать входные данные) позволило выявить аномалии в данных временных рядов. Значения выше определенного порога, рассчитанного как среднее значение плюс два стандартных отклонения, могут быть классифицированы как аномальные.

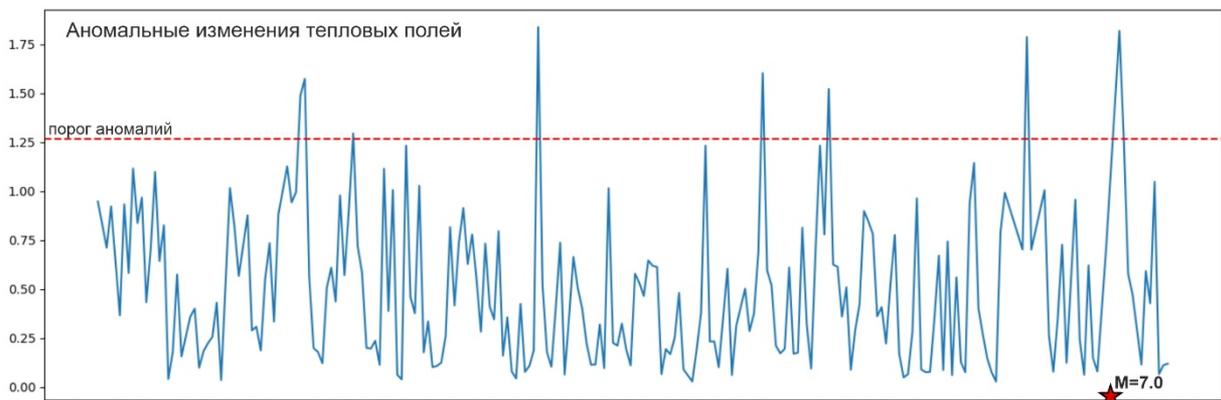
Аномальные изменения тепловых полей в 2024 г. относительно многолетних значений (2004-2023гг.) выявлены 30 июля 2024 г. за 19 дней до землетрясения ( $M=7.0$ ).

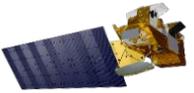
Аномалии зафиксированные в дни (17 февраля, 10 апреля, 31 мая, 15 июня), выявлены в период сейсмической активности ( $M4.0-5.5$ ).

Аномальные изменения ТЕС в 2024 г. относительно многолетних значений (2001-2023гг.) выявлены 12-21 июля, 11, 16-18 августа 2024 г.

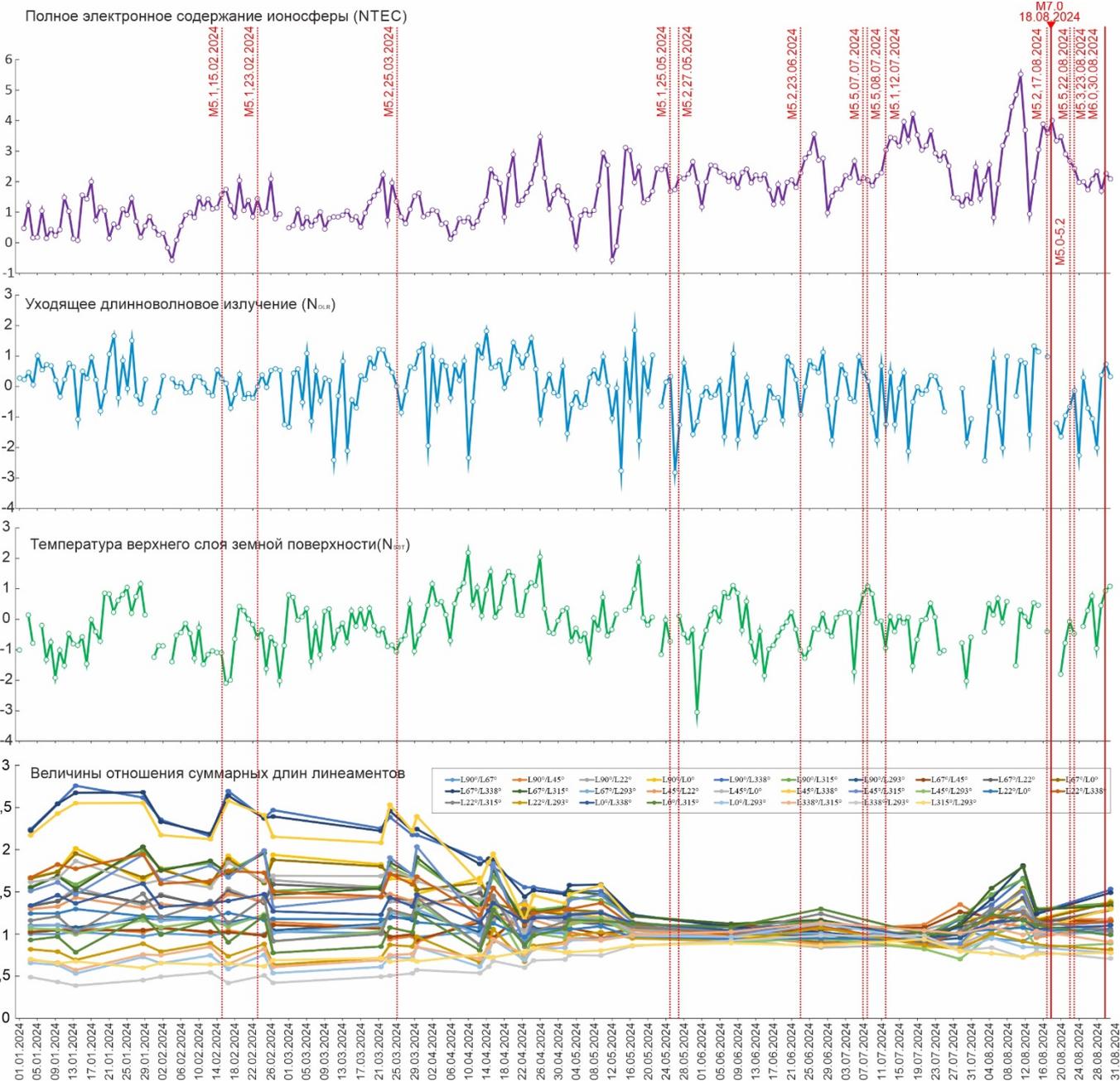
В период 12-21 июля и 11 августа было зарегистрировано повышение солнечной активности, также 10-15 июля наблюдалась вулканическая активность.

11 и 16 августа выявлены локальные аномалии DTEC в области подготовки серии землетрясений  $M5.0-7.0$ .





# СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



Выявлен рост нормализованных значений NTEC за 9 дней до землетрясения 18.08.2024 г. M=7.0, 11 августа (за 7 дней до землетрясения) наблюдались максимальные значения, затем 13 августа зарегистрировано падение NTEC и снова рост 16 августа (за 2 дня до землетрясения).

Аномальные изменения уходящего длинноволнового излучения выявлены с 30 июля по 15 августа 2024 г.

Аномалии температуры верхнего слоя земной поверхности зафиксированы 30 июля 2024г. (за 19 дней до землетрясения M=7.0).

Величины отношения суммарных длин линеаментов начинали расти или уменьшаться по мере приближения землетрясения, произошедшего 18.08.2024г. (M=7.0), достигая максимального значения 11.08.2024г. (за 7 дней до землетрясения).