



Казахский Национальный Исследовательский Технический
Университет,
Институт Геологии и Нефтегазового Дела
Кафедра “Геофизики”

Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

Лекция 7. Часть 2

Атмосферные и ионосферные аномалии,
предшествующие сильному землетрясению

По материалам: Лукьяновой Р., Даурбаевой Г., Сыилхановой А. (2024)

Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК

Введение

Обнаружение аномальных изменений в атмосфере и ионосфере до и во время сильных землетрясений является предметом интенсивных исследований в связи с важностью разработки методов прогнозирования и раннего оповещения. За последнее десятилетие было проведено множество наземных и спутниковых наблюдений от поверхности Земли до ионосферы для обнаружения возможных эффектов, связанных с сейсмической активностью и ее предвестниками.

Рабочая гипотеза «электромагнитного сигнала» заключается в том, что в ионосфере электрическое поле, генерируемое над разломом из-за сейсмической активности, заставляет плазму дрейфовать в скрещенных электрическом (E) и геомагнитном (B) полях. В частности, восточная компонента E перемещает ионосферную плазму вверх и тем самым приводит к увеличению концентрации электронов на определенной высоте над максимумом слоя F2.

Средняя величина электрического поля в ионосфере оценивается в 10 мВ/м а горизонтальные масштабы — в 100–1000 км. Такие поля часто обнаруживались высокоширотными радарами.

Наблюдения со спутников Demeter и CSES показали возмущения в ионосферном электрическом поле, возможно, связанные с ОНЧ/УНЧ электромагнитными волнами, обнаруженными в сейсмических регионах.

Наблюдения со спутника Swarm за месяц до и после Непальского землетрясение показали изменения общего электронного содержания (TEC), выявили общую закономерность в магнитных аномалиях и сейсмичности. Эти аномалии обычно варьируют от нескольких минут до 30 дней до значительного землетрясения.

Опубликованы работы, в которых сообщалось об аномалиях в ионосферном ТЕС, наблюдавшихся: а) примерно за 40 минут до землетрясения на северо-востоке Японии; б) за два дня до события в Кукане; в) за шесть-семь дней до землетрясения в Марокко в сентябре 2023 года. *Статистически определено, что более 90% аномалий ТЕС, связанных с землетрясениями, происходят примерно за семь дней до события.*

Статистически, ионосферные аномалии были обнаружены перед некоторыми сильными землетрясениями, но перед другими аномалий не было, что до сих пор остается неясным.

Статистический анализ измерений спутниковой группировки Swarm Европейского космического агентства (ESA) показал, что ионосфера действительно подвержена влиянию землетрясений, а *быстрое возмущение электронной плотности (Ne) является формой сейсмического ионосферного ответа.*

Введение

Однако эти возмущения слабы и часто скрыты на фоне общих возмущений магнитосферного или термосферного происхождения, таких как атмосферные гравитационные волны и связанные с ними перемещающиеся ионосферные возмущения (TID- traveling ionospheric disturbances), плазменные пузыри, спорадические, ионосферные возмущения из-за быстрого проникновения электрического поля в средних широтах или крупномасштабные неоднородности, возникающие в высоких широтах и зависящие от взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой.

Степень ионосферной изменчивости, включая горизонтальные и вертикальные смещения плазмы, увеличивается с ростом геомагнитной активности.

Результаты моделирования показали, что для обеспечения проникновения достаточной части электрического поля на ионосферные высоты требуется повышенная проводимость воздуха. С появлением свободных зарядов в атмосфере возникает вертикальный электрический ток. Это общий подход в рамках теории Глобальной электрической цепи (GEC), который может быть применен к косейсмическому электрическому полю и его ионосферным и атмосферным эффектам.

Пред- и косейсмические ионосферные эффекты считаются результатом усиления естественной радиоактивности вблизи поверхности Земли. Радиоактивные газы, такие как радон, выделяющиеся из земной коры, обеспечивают дополнительные заряды, накапливающиеся на аэрозолях в нижней тропосфере. В присутствии крупных тяжелых молекул, таких как почвенные газы, пыль, зола, металлические частицы и другие аэрозоли, свободные электроны быстро присоединяются к ним.

Из-за медленной скорости рекомбинации во вновь образованных крупных заряженных частиц происходит увеличение концентрации зарядов. Заряженные аэрозоли усиливают ионизацию пограничного слоя воздуха, изменяют его электропроводность, тем самым способствуя возникновению возмущений электрического поля и их эффективному проникновению в ионосферу.

Период полураспада Rn-222 составляет 3,8 суток, а его регистрация базируется на α - и γ -компонентах распада радона и имеет большую степень неопределенности. При ограниченности регулярных данных мониторинга радона.

В районе эпицентра рассматриваемого события таких измерений нет. Однако можно измерить реакцию атмосферы на ионизацию воздуха, вызванную радоном

Введение

Повышенная концентрация радона и заряженных частиц (ионов, кластеров и аэрозолей), на которых конденсируется водяной пар, вызывают снижение относительной влажности воздуха и, как следствие, увеличение скрытой теплоты.

В данной статье представлен комплексный анализ ионосферных и метеорологических наблюдений во время сильного ($M = 7$) землетрясения, произошедшего 22.01.2024г. в Центральной Азии (эпицентр вблизи Синьцзяна). Пространственная протяженность толчков была относительно большой, затронув южную часть Казахстана.

Наблюдения со спутников Swarm, которые обеспечивают измерения электронной плотности *in situ* и пространственно-временные распределения метеорологических параметров проанализированы с целью выявления возможных аномалий, связанных с землетрясениями и их фоновой изменчивостью.

Землетрясение магнитудой $M=7$ 22 января 2024 г.

22 января 2024 г. в 18:09 UT произошло крупное землетрясение в пределах горного хребта Тянь-Шаня на границе Китая (Южный Синьцзян) и Киргизской Республики с эпицентром в хребте Кок-Шаал-Тау. Глубина очага составила 13 км, магнитуда — $M \geq 7$ (по шкале Рихтера).

Горный хребет Тянь-Шаня представляет собой внутриплитный складчато-надвиговый пояс, тектонически контролируемый столкновением Индии с Азией. Согласно тектоническому обзору, предоставленному Геологической службой США (USGS), землетрясение 22.01.024 г. было результатом косого взброса и сдвига на небольшой глубине.

Сразу после главного толчка произошла серия афтершоков из того же источника. К местному утру (~05 UT) 23 января было зарегистрировано 22 повторных землетрясения магнитудой около 4.0 и более 100 более слабых афтершоков. На рисунке 1 показано расположение эпицентра землетрясения на карте активных разломов Евразии, предоставленной Геологическим институтом РАН.

Это сейсмически активный регион, хотя крупные землетрясения происходили довольно редко. За последние 100 лет три события $M > 6,5$ произошли в радиусе 250 км от эпицентра события 22 января. Это были землетрясение магнитудой 8,0 в Кемине в январе 1911г. недалеко от современной границы Кыргызстана и Казахстана, и землетрясение магнитудой 7,1 в марте 1978г. в Тюпе, Кыргызстан.

Землетрясение магнитудой $M=7$ 22 января 2024 г.

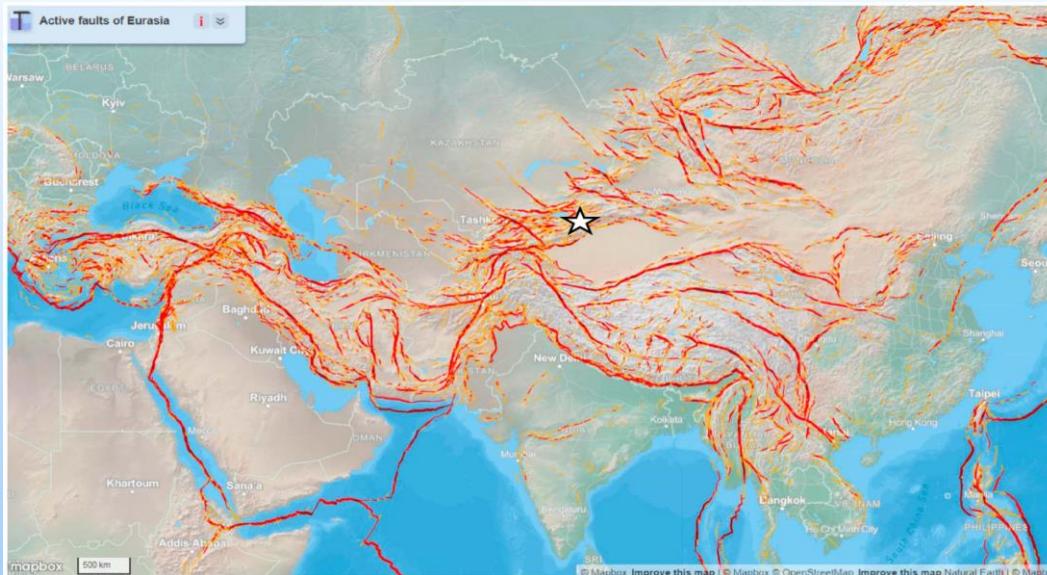


Рисунок 1. Расположение эпицентра землетрясения (белая звезда) на карте активных разломов Евразии. Интенсивность разлома обозначена желто-темно-красным цветом.

Событие в Тюпе спровоцировало сотрясение с интенсивностью, весьма близкой к той, что была 22 января 2024 года, в то время как событие магнитудой 8,0 в Кемине полностью разрушило город Верный (ныне Алматы).

Возможно, что теперь в регионе Тянь-Шаня может начаться новый долгосрочный период повышенной сейсмичности.

2. Геомагнитная и ионосферная активность

Различные глобальные ионосферные возмущения связаны с солнечными вспышками и выбросами корональной массы. Высвобождаемая сейсмическая энергия, связанная с крупными землетрясениями, вызывает локальные и более краткосрочные ионосферные аномалии, которые накладываются на текущее состояние ионосферы. Задача состоит в том, чтобы разделить отдельные источники возмущений Ne, особенно если Солнце не спокойно.

2.1. Геомагнитные индексы и солнечная активность

Ожидается, что любой возможный косейсмический сигнал в плотности ионосферной плазмы проявится как отклонение от фонового уровня, типичного для конкретного местоположения и времени.

Геомагнитная и ионосферная активность

Считается, что глобально спокойные геомагнитные условия, отслеживаемые планетарными геомагнитными индексами, являются основным критерием для исключения возможного внешнего воздействия на изменчивость ионосферы.

Рассматриваемое землетрясение произошло в период длительного периода геомагнитного спокойствия.

На рисунке 2 показаны кольцевой ток магнитной бури Dst и индексы ар средних широт за 3-месячный период с ноября 2023 года по январь 2024 года, полученные с портала данных NASA OMNI.

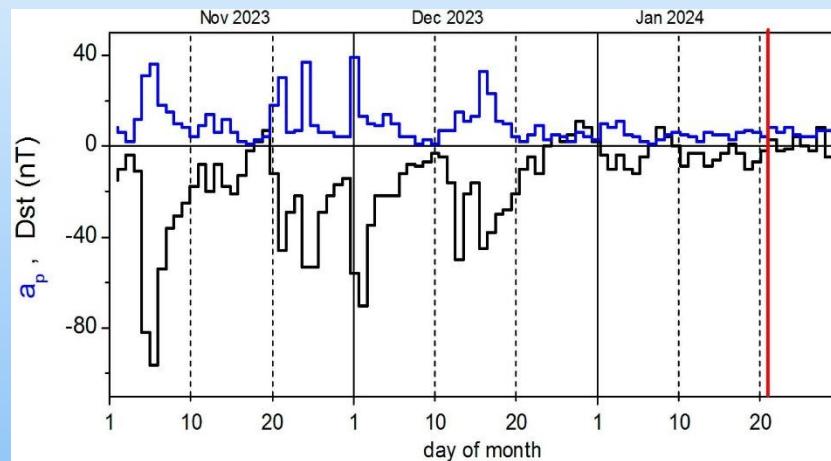


Рисунок 2. Индексы Dst и ар за 3-месячный период с ноября 2023 г. по январь 2024 г. День землетрясения 22 января отмечен вертикальной красной линией.

Фоновый уровень Dst и ар равен нулю. Принято считать, что при $Dst > -50$ нТл магнитная буря отсутствует. Индекс ар можно оценить в соответствии с критериями Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) для планетарного индекса Кр, а именно $Kp < 2$ ($ap < 20$ нТл), что является геомагнитным спокойствием.

Только в начале ноября произошла слабая магнитная буря, во время которой индекс Dst кольцевого тока опустился ниже -80 нТл. Магнитная активность продолжала оставаться несколько повышенной до конца декабря, и после этого индекс Dst не опускался ниже -20 нТл, что указывает на отсутствие геомагнитных бурь. Планетарный индекс ар увеличивался в соответствии с эволюцией Dst. В течение первой половины периода ар иногда достигал 40 нТл, а в январе не превышал 10 нТл.

Геомагнитная и ионосферная активность

На рисунке 3 параметры солнечной и космической активности описаны для более короткого периода, для дня землетрясения. Похоже, что, несмотря на геомагнитное спокойствие, Солнце не было спокойным, а его выбросы могли влиять на плотность ионосферной плазмы, в то время как электрические токи, текущие в цепи магнитосфера-ионосфера, оставались относительно незатронутыми.

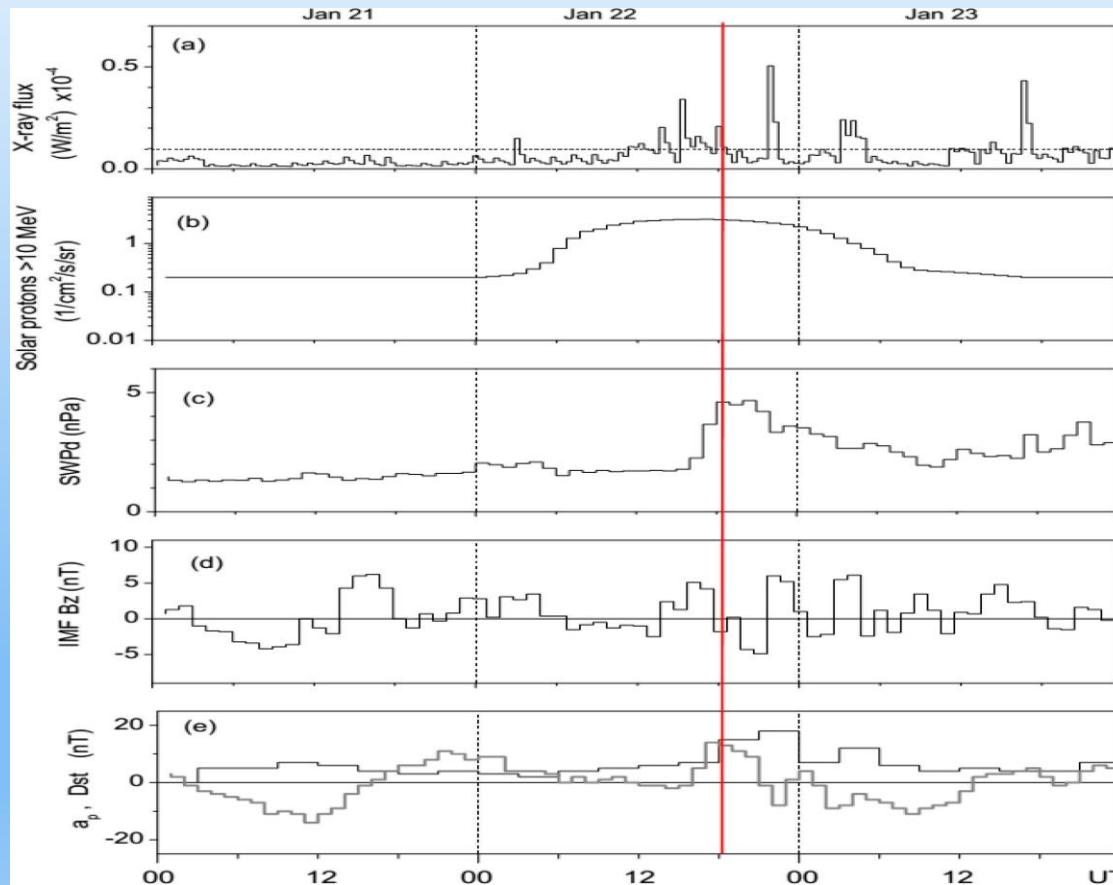


Рисунок 3: (a) - поток рентгеновского излучения (горизонтальная линия показывает уровень M-вспышки), (б) - поток солнечных протонов $>10 \text{ МэВ}$, (в) - P_d SW; (с) - B_z -компоненты ММП; (д) - индексы Dst и a_p 21–23 января 2024 г. Время землетрясения отмечено вертикальной красной линией.

Геомагнитная и ионосферная активность

Первая панель (рисунок 3а) отображает активность солнечных вспышек. Это данные рентгеновского датчика GOES-R (XRS), которые основаны на измерениях мягкого рентгеновского излучения, охватывающих интегрированные полосы пропускания 0,1–0,8 нм.

Согласно классификации NOAA уровень потока рентгеновского излучения $\geq 10^{-8}$, 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} и 10^{-4} Вт/м² соответствует вспышкам классов А, В, С, М и Х соответственно.

Рисунок 3а показывает, что 21 января вспышка солнечной активности была относительно слабой. 22 января поток рентгеновского излучения достиг 3×10^{-5} (15 UT) и 5×10^{-5} Вт/м² (23 UT), что говорит о вспышках класса М. На следующий день наблюдалась пара пиков схожей амплитуды. Обычно рост рентгеновского излучения сопровождается более интенсивным излучением в EUV-диапазоне.

Повышенный уровень рентгеновского и EUV-излучения (сверхжёсткое- экстремальное, *extreme ultra violet-ультрафиолетовое излучение*) приводит к ионизации нижних слоев ионосферы, особенно на дневной стороне, что приводит к увеличению ТЕС.

Вторая панель (рисунок 3б) показывает солнечный поток протона с энергией ≥ 10 МэВ, который начал увеличиваться 22 января, что привело к уменьшению высоты ионизации и увеличению интенсивности ионизации и электронной плотности в ионосфере. Пиковые высоты скоростей ионизации солнечных протонов составили около 40 км.

Событие 22 января было довольно незначительным и не было включено в список NOAA (*National Oceanic Space and Atmospheric Administration*) Weather Prediction Center событий, влияющих на окружающую среду Земли. Тем не менее, оно способствовало повышению электропроводности на определенных высотах.

На последних трех панелях (рисунок 3с–е) представлены часовые значения динамического давления солнечного ветра (SW) P_d ($P_d = n \cdot SWV^2$, где V и n — скорость и плотность SW), компоненты B_z межпланетного магнитного поля (ММП) и индексов Dst и ap.

В 18 UT 22 января наблюдалось резкое увеличение P_d с 1 гПа до 4,5 гПа с крутым подъемом и плавным падением. В то же время B_z ММП повернулся на юг на несколько часов, но достиг только -5 нТл. Сжатие магнитопаузы привело к положительному росту Dst до 15 нТл.

Геомагнитная и ионосферная активность

Геомагнитный отклик на приход импульса SWPd является глобальным и проявился в росте индекса ар до 18 нТл в конце 22 января, когда он приблизился к верхней границе уровня спокойной активности.

Вместе с тем, параметр SW был слишком слаб, чтобы спровоцировать даже незначительную магнитную бурю (согласно критериям NOAA, незначительная буря G1 происходит при $\text{ар} > 48 \text{ нТл}$). В то же время, повышенные потоки рентгеновского и EUV-излучения, а также солнечных протонов действительно производят дополнительную ионизацию во всей ионосфере и даже в средней атмосфере, что затруднило выявление роста Ne из-за сейсмичности и естественной изменчивости, вызванной эффектами космической погоды.

Исследование ТЕС важно для установления фоновой плотности ионосферной плазмы над областью возникновения возможной ионосферной аномалии, связанной с косейсмическим эффектом.

Изменение измерений ТЕС

ТЕС (из-за его определения) учитывает весь ионосферный слой вплоть до плазмосферы и в первую очередь зависит от солнечного EUV-излучения, которое формирует его регулярный суточный цикл.

По мере увеличения геомагнитной активности картина становится более сложной из-за возросших электрических полей, дрейфа плазмы, исходящих потоков ионов, ионосферных токов и авроральных осадков, которые изменяются в разных пространственных и временных масштабах.

Для учета естественных ионосферных вариаций используются Глобальные ионосферные карты (GIM) ТЕС с пространственным разрешением $2,5^\circ \times 5^\circ$.

На рисунке 4 представлены карты GIM-ТЕС Северного полушария (0° – 70°N) для 18 и 23 UT 21–23 января. Эпицентр землетрясения показан белой точкой на панелях (b) и (e). Выбор именно этих UT обусловлен тем, что в 18 UT произошел главный толчок землетрясения, а в 23 UT область землетрясения пересекли нисходящие орбиты спутников Swarm.

Геомагнитная и ионосферная активность

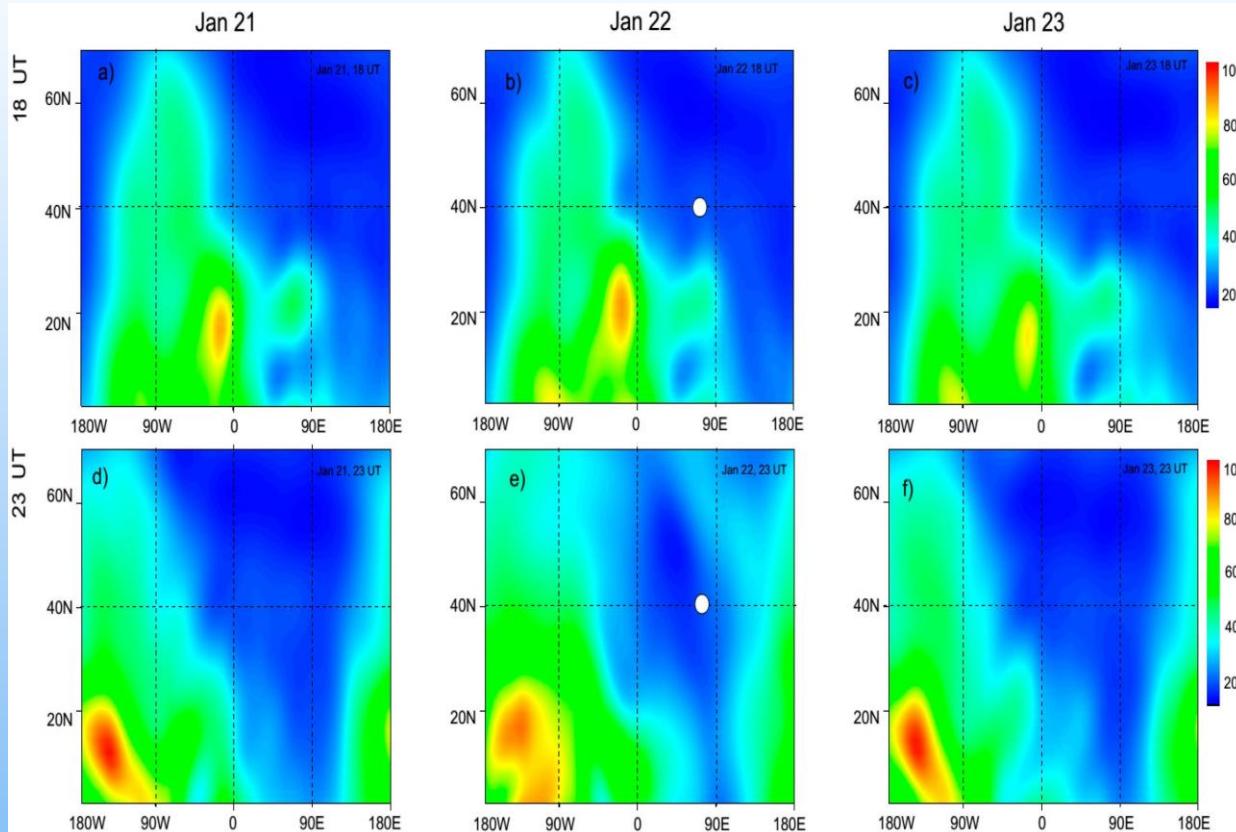


Рисунок 4. Распределение GIM-TEC в широтном диапазоне 0° – 70° N в 18 UT (первая строка) и 23 UT (вторая строка) для (a, d) 21 января, (b, e) 22 января, (c, f) 23 января. Эпицентр землетрясения показан белой точкой на панелях (b, e). Цветная полоса показывает, что TEC находится в TECU. 1 TECU = 1016 электронов/ m^2 \approx 0.16 м для навигационного сигнала L1.

Распределение ТЕС определяется суточными вариациями, и они постепенно уменьшаются с увеличением широты. В 18 UT область землетрясения находится почти на ночной стороне Земли.

Визуально разница между распределениями ТЕС в 18 UT для трех последовательных дней, представленных на рисунке 4a–c, весьма незначительна.

Для 23 UT (рисунок 4d–f) регистрируется рост значений ТЕС над эпицентром. На этом фоне карта ТЕС для 22 января, 23 UT (рисунок 4e) значительно отличается от карт для соседних дней, что вызвано относительным увеличением ТЕС по всему полушарию.

Геомагнитная и ионосферная активность

Повышенный ионосферный шлейф ТЕС имеет тенденцию расширяться от дневного времени к ночному и от экватора к более высоким широтам. Глобальное увеличение плотности плазмы можно объяснить реакцией ионосферы на повышенную скорость ионизации, связанную с эффектом солнечной вспышки.

Поэтому, любые возможные аномальные сигнатуры в ионосферном Ne, которые могут содержать эффекты индуцированных космических сигналов, следует рассматривать на фоне естественных внутри ионосферных возмущений, вызванных космической погодой.

К примеру, в 23 UT, 22 января, из-за солнечной вспышки, ТЕС увеличился глобально, включая ионосферу над зоной землетрясения.

Для количественной оценки эволюции ТЕС в глобальном масштабе и вблизи эпицентра землетрясения был построен 3-дневный временной ряд часовых значений. На рисунке 5 показаны значения ТЕС, усредненные по Северному полушарию (0° – 70° N) и собранные в точке сетки 40° N, 80° E за период 21–23 января.

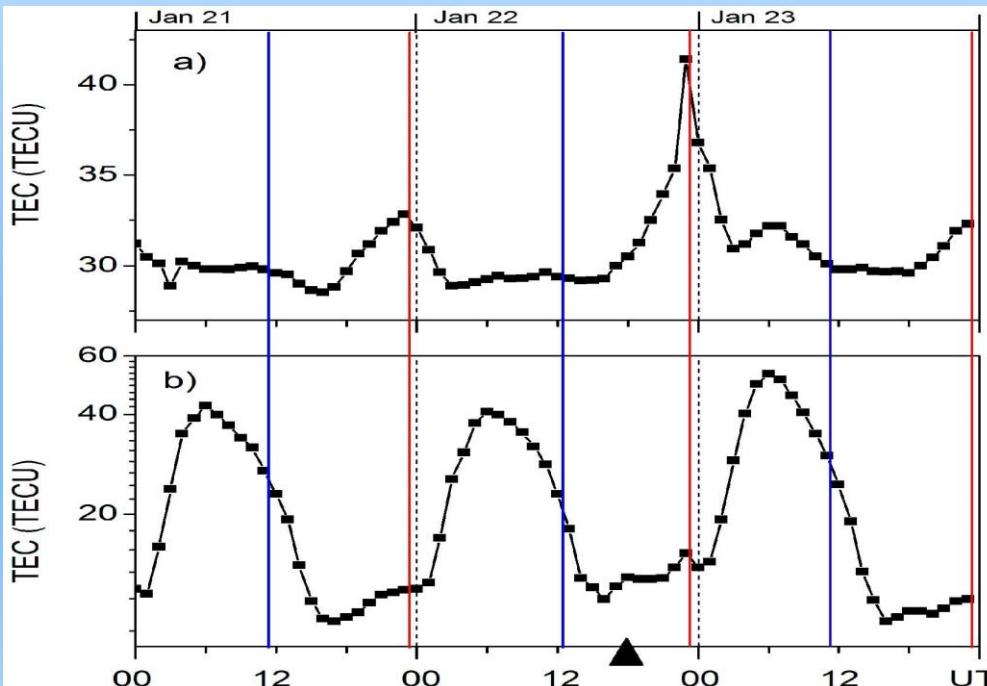


Рисунок 5. Значения ТЕС (a), усредненные по Северному полушарию (0° – 70° N) и (b) в точке сетки 40° N, 80° E за период 21–23 января. Время землетрясения обозначено черным треугольником на оси x. Обратите внимание на логарифмическую шкалу на панели (b). Красные (синие) вертикальные линии отмечают время нисходящей (восходящей) орбиты спутника, когда он проходил вблизи эпицентра.

Геомагнитная и ионосферная активность

Времена прохождений спутников Swarm A/C вблизи эпицентра на восходящих и нисходящих орbitах обозначены вертикальными линиями. Обычно полусферический ТЕС (рисунок 5а) демонстрирует регулярную суточную вариацию с немного большими значениями около 00 UT.

В конце 22 января полусферический ТЕС начал быстро расти, и в 23 UT он достиг пика ~40 TECU, что как минимум вдвое выше, чем в предыдущий или последующий день. Ночной ТЕС составляет около 10 TECU и составляет более 10% от ТЕС. В 23 UT, 22 января, наблюдается заметный скачок к более высоким значениям (рисунок 5б).

Важно отметить, что на рисунке 5б можно идентифицировать уменьшение ТЕС в ~16 UT 22 января. *Вероятно, этот отрицательный тренд можно считать признаком ионосферного предвестника землетрясения, но точное происхождение этого уменьшения трудно определить.*

Локальные вариации Ne в верхней ионосфере во время сейсмической активности

Чтобы выявить локальные особенности ионосферы в интересующем периоде, мы использовали данные Swarm, которые позволили обнаруживать ионосферные возмущения *in situ* на фиксированной высоте выше пиковой высоты слоя F2 и исследовать, как влияние землетрясения 22 января проявляется на фактических вариациях Ne.

Спутники Swarm и данные

Три идентичных спутника Swarm ЕКА находятся на определенных низкоквазиполярных орбитах. Они не являются солнечно-синхронными, и позволяют спутникам быстро перемещаться по местному времени (LT).

Локальные вариации Ne в верхней ионосфере во время сейсмической активности

Два спутника (SwA и SwC) летят в тандеме на высоте ~ 460 км (в верхнем слое F) близко друг к другу на расстоянии около 150 км, с дифференциальной задержкой на орбите в несколько секунд. Третий спутник (SwB) летит в другой меридиональной плоскости на высоте ~ 530 км.

Спутники совершают оборот вокруг Земли 14–15 раз в день, пролетая в определенных секторах LT. Каждый спутник оснащен скалярными и векторными магнитометрами, дискретизация которых составляет 1 Гц (скалярный) и 50 Гц (векторный).

Зонд Ленгмюра (LP) контролирует плотность ионосферной плазмы с частотой дискретизации 2 Гц.

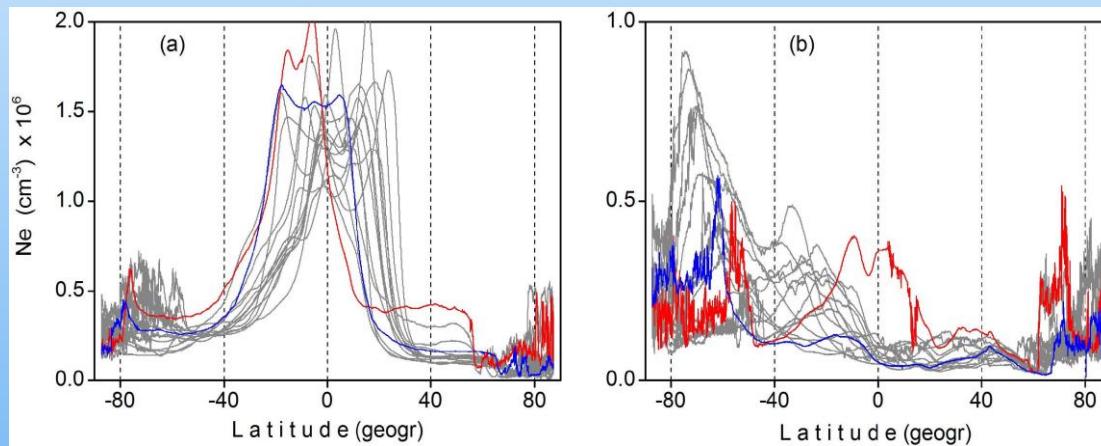


Рисунок 6. Широтные профили SwC Ne (в 10^6 см^{-3}), измеренные вдоль (a) восходящей (17 LT) и (b) нисходящей (05 LT) траекторий 22 января. Первое (последнее) прохождение в течение дня показано синим (красным) цветом.

На рисунке 6 показаны широтные профили Ne вдоль прохождений SwC за полный день 22 января. В 17 LT Ne достигает $2 \times 10^6 \text{ эл/см}^3$, а в 05 LT, почти наочной стороне Земли, Ne на порядок меньше. Переход в среднеширотную ионосферу ($20\text{--}30^\circ$) характеризуется быстрым изменением плотности плазмы.

В обоих полушариях по мере перемещения спутника из средних широт в авроральную зону (область, занимаемая полярными сияниями) Ne увеличивается и становится более изменчивой.

Ионосферные возмущения над зоной землетрясения

На рис. 6 первое и последнее прохождение дня показаны цветными линиями. В конце 22 января Ne, измеренная вдоль обеих ветвей орбиты, была значительно больше, чем в предыдущие часы. Это согласуется с ростом ТЕС, наблюдавшимся в 23 UT 22 января (ср. рисунки 4 и 5).

Ионосферные возмущения над зоной землетрясения

Для обнаружения локальных аномалий Ne над областью, окружающей эпицентр землетрясения, были выбраны проходы Swarm в области 30° – 45° Н, 64° – 94° В с радиусом 1000 км.

Прямоугольник центрирован на меридиане эпицентра землетрясения со стороной 15° . Широтная протяженность была выбрана вдвое короче долготной.

Геометрия и размер прямоугольника были выбраны из соображений: а) широтной ориентации активных разломов; б) желанием поймать больше пролетов спутника над выбранной областью. На высоте орбиты берется пространственное окно больше, чем то, которое контролируется наземным параметром R. В пределах этого окна измерения по трассе показывают точные координаты аномалии Ne.

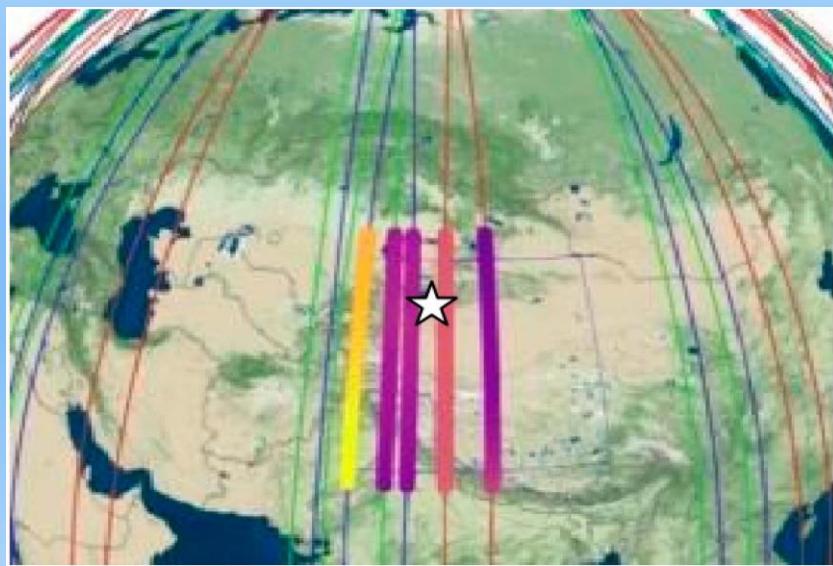


Рисунок 7. Проекции орбиты Swarm на 22 января. Траектория SwA, SwB и SwC показана тонкой линией синего, красного и зеленого цветов соответственно. Сегменты траектории, попадающие в прямоугольную область вокруг эпицентра (белая звезда), выделены толстыми линиями: оранжевыми (фиолетовыми) для SwA/SwC (SwB).

Ионосферные возмущения над землетрясения

Рисунок 7 иллюстрирует прохождение спутников Swarm в непосредственной близости от эпицентра землетрясения 22 января (толстые линии) вместе с другими близлежащими треками в этот день (тонкие линии). Прохождения тандема спутников SwA/SwC были в ~12 и ~23 UT; прохождения Swarm_B произошли в ~08 и 14 UT.

Для исследования временной эволюции Ne до, во время и после землетрясения в течение 15-дневного периода с центром в день главного толчка были выбраны данные от SwA и SwC, летающих парами. Для каждого дня с 14 по 28 января данные Ne были извлечены, соответственно, между 30° – 45° N и 64° – 94° E для нисходящих (ночные полуорбиты) и восходящих (дневные полуорбиты) узлов. Затем был сформирован временной ряд последовательных прохождений.

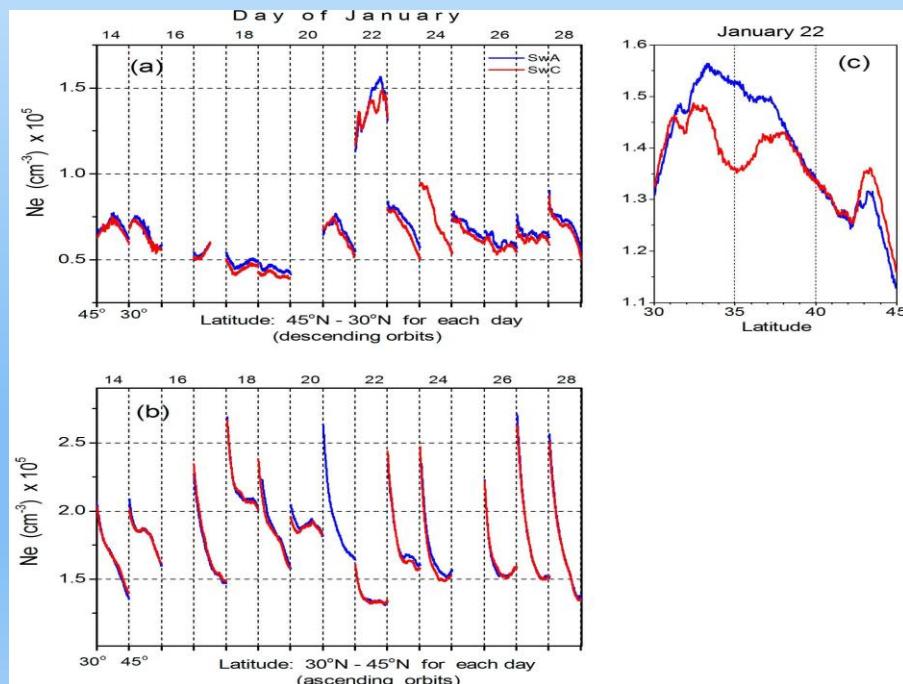


Рисунок 8. Сложенный график вариаций Ne (в 10^5 см $^{-3}$) вдоль траектории SwA (синий) и SwC (красный) между 30° N и 45° N 14–28 января: (a) нисходящие орбиты, 05 LT; (b) восходящие орбиты, 17 LT; (c) нисходящая орбита 22 января. На панелях (a, b) каждый отдельный день разделен вертикальной пунктирной линией.

Ионосферные возмущения над зоной землетрясения

На рисунке 8 представлена сложенная панель вариаций Ne от SwA и SwC в зависимости от широты в диапазоне 30° – 45° N, как это фактически наблюдалось вдоль последовательных нисходящих (рисунок 8a) и восходящих (рисунок 8b) орбит 14–28 января. Ne для даты землетрясения 22 января показано в большем масштабе на отдельной панели (c).

Как показывает рисунок 8a, ранним утром значения ионосферы Ne близки к $0,7 \times 10^5$ эл/см³. 18 и 19 января Ne опустилось ниже $0,5 \times 10^5$ эл/см³ (20 января соответствующих прохождений над выбранной областью не было). 22 января, в день возникновения главного толчка в 18 UT, Ne подскочило до $1,5 \times 10^5$ эл/см³.

Такое резкое трехкратное увеличение Ne можно ожидать, поскольку эта особенность, вероятно, является частью крупномасштабного расширения TEC на дневной стороне.

Проходы через более освещенную солнцем (17 LT) ионосферу выявили гораздо большие значения Ne (рисунок 8b). Спутники наблюдали постепенное уменьшение Ne с увеличением широты.

Стоит отметить, что среди рассматриваемых дней 22 января характеризуется самыми низкими значениями Ne. Причина этой особенности не ясна, но может быть связана с локальным перераспределением ионосферной плазмы.

Из рисунка 8 видно, что вариации Ne, измеренные вдоль нисходящих орбит SwA/SwC, когда зимняя ионосфера находится в темноте, более информативны в смысле возможного косейсмического сигнала, чем освещенная солнцем ионосфера. Они заслуживают дальнейшего анализа.

Для обнаружения аномалий, возможно, связанных с сильным землетрясением, мы рассчитали разницу (Δ Ne) между значениями Ne SwA и SwC. При таком подходе фоновое поле автоматически устраняется. SwC пролетел на 7с впереди SwA, а расстояние между спутниками составило $1,4^{\circ}$ по долготе, что дает общее расстояние около 150 км.

Чтобы выявить конкретные изменения плотности плазмы 22 января по сравнению с другими днями, на рисунке 9 показан стекированный график Δ Ne за 14–28 января, на котором видно, что Δ Ne обычно слегка положительна (т. е. SwA Ne превышает SwC Ne, что, вероятно, связано с калибровкой LP), с нерегулярными колебаниями в диапазоне $<10^4$ эл/см³.

Ионосферные возмущения над зоной землетрясения

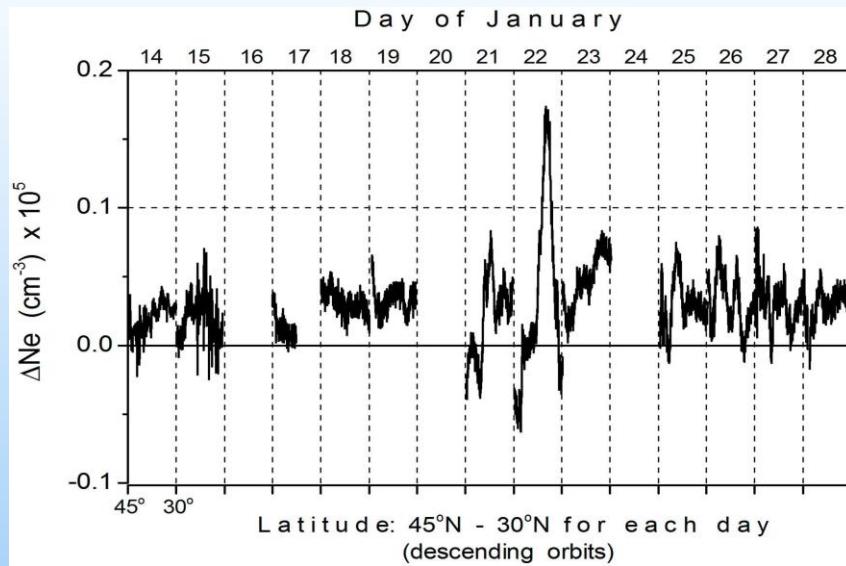


Рисунок 9. Диаграмма стека разностей (ΔNe в 10^5 см $^{-3}$) между значениями Ne от SwA и SwC вдоль нисходящих орбит 14–28 января.

2 января форма изменения ΔNe была совершенно иной. Она выглядит как пик, который почти вдвое выше и превышает $0,15 \times 10^5$ эл/см 3 , с максимумом при $\sim 35^\circ$ N. Амплитуда пика ΔNe составляет около 10% от фонового уровня по сравнению с усиленным Ne 22 января и ~20% по сравнению с другими днями.

Эта сигнатура подразумевает наличие горизонтальных ионосферных неоднородностей и крутых градиентов Ne , а также подъем или опускание ионосферного слоя относительно высоты спутника.

Изменение Ne может быть вызвано только процессами переноса. Хотя нет возможности различить, является ли перенос вертикальным, горизонтальным или комбинацией обоих, *наиболее вероятным кандидатом на движущую силу любого движения плазмы является электрическое поле, каким-то образом генерируемое в ионосфере над эпицентром землетрясения*.

Если электрическое поле изменяется в горизонтальной плоскости, плазма движется вертикально. Ее вертикальный профиль изменяется таким образом, что Ne изменяется на заданной высоте.

Кроме того, TIDs (ионосферные возмущения) могут играть роль в движении плазмы в верхней ионосфере, но это явление проявляется в регулярных изменениях меньшей амплитуды, обнаруженных обоими

Совмещенные атмосферные возмущения

спутниками. Наблюдаемые неровности локализованы в районе меридиана 81°E (эпицентр землетрясения находится на 79°E) и не распространяются на соседние долготы. Дополнительная проверка обеспечивается наблюдениями с разных долгот.

Совмещенные атмосферные возмущения

Рассмотрим эволюцию метеорологических параметров - влажности, потока скрытого тепла и аэрозольной нагрузки, в области вокруг эпицентра, которая была отобрана для пролетов спутников Swarm.

Для локальных тропосферных параметров метеорологическая аномалия определяется как отклонение от уровня, установленного за 10 дней до и 10 дней после рассматриваемого землетрясения.

Удельная влажность

Удельная влажность (Specific humidity -SH) — это отношение веса водяного пара в указанном объеме к весу сухого воздуха в том же объеме. В выбранной области скорость сезонного цикла с минимумом в зимние месяцы составляет около 10^{-4} единиц SH на один градус температуры по данным MERRA-2.

В контексте связи между землетрясениями и атмосферными возмущениями можно ожидать, что из-за конденсации влаги на ионных кластерах количество свободных молекул водяного пара в воздухе уменьшается, что регистрируется как уменьшение влажности.

На рисунке 11а можно увидеть временную динамику регионального SH с постепенным снижением, начинающимся примерно за 7 дней до землетрясения, глубоким минимумом 21–22 января, когда SH упал до $\sim 0,0008$ с $\sim 0,0016$, и постепенным восстановлением в течение 5 дней после землетрясения.

Следует отметить, что SH напрямую связан с температурой воздуха. Фактически измеренная температура воздуха в городе Алматы представлена на рисунке 11б. Температура была в основном отрицательной. После 15 января она имела тенденцию к похолоданию, при этом не наблюдалось выраженного снижения, аналогичного таковому в SH.

Таким образом, тепловые изменения в приземном слое воздуха и поведение SH довольно соответствовали термодинамике атмосферы.

Совмещенные атмосферные возмущения

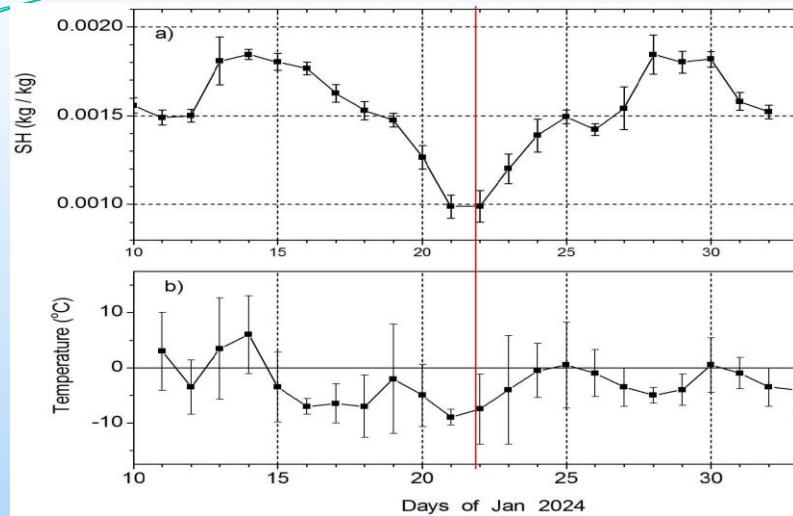


Рисунок 11. Временной ряд (а) суточных значений удельной влажности с 10 января по 1 февраля; каждая точка представляет собой значение SH , усредненное по области $35^{\circ}\text{--}45^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\text{--}95^{\circ}\text{E}$, и (б) температуры в городе Алматы; среднее из самых высоких и самых низких суточных значений. Время EQ обозначено красной линией.

В некоторых исследованиях сообщалось о возникновении положительных тепловых аномалий, связанных с землетрясениями.

Однако для этого события не обнаружено четких указаний на повышенную температуру воздуха в период землетрясения.

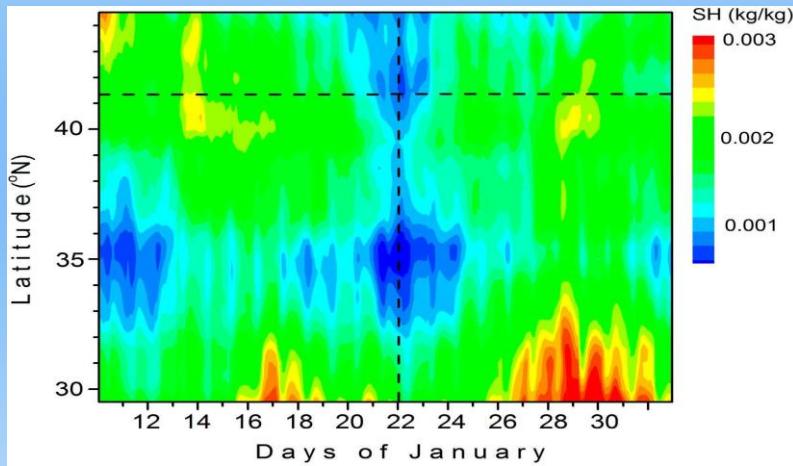


Рисунок 12. Диаграмма «время–широта» для часовых средних значений SH , усредненных по долготам $65^{\circ}\text{--}95^{\circ}\text{E}$. Время EQ (широта EQ) обозначено вертикальной (горизонтальной) линией.

Совмещенные атмосферные возмущения

Для определения географического положения минимума на рисунке 12 мы показываем диаграмму пространственно-временной изменчивости SH, которая позволяет визуализировать эволюцию параметра по его статическим изображениям.

Пространственное распределение аномалий, показанное на рисунке 12, предполагает, что SH падает чуть выше эпицентра и за день до главного толчка.

Диаграмма также показывает квазисистематическое широтное изменение SH, которое сохраняется в течение всего периода времени. Положительные максимумы идентифицированы около 42° и 30° N, в то время как уменьшение наблюдается на $\sim 35^{\circ}$ N. Это напоминает сигнатуру планетарной волны, которая часто наблюдается в атмосферных параметрах.

Однако падение влажности, произошедшее 22 января в районе 40° – 42° N, по-видимому, не связано с волновым цугом. *Скорее, это «одиночная» сигнатура усиленной конденсации водяного пара и выделения скрытого тепла, которая может быть связана с землетрясением, поскольку усиление разлома сопровождается дополнительной ионизацией воздуха из-за эманации радона.*

Скрытый тепловой поток и оптическая толщина аэрозоля

Дополнительные доказательства метеорологических возмущений можно получить из рисунка 13, который показывает ежедневные значения скрытого теплового потока (LHF) с 11 января по 1 февраля. Этот рисунок сосредоточен на поведении LHF в более узком широтном диапазоне 40° – 42° N, где наблюдался аномальный SH.

Можно видеть, что между 21 и 23 января наблюдается выраженное усиление с максимумом $5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ 22 января. LHF также имеет тенденцию к увеличению в начале и конце 20-дневного периода с центром в день землетрясения.

Это подразумевает выброс дополнительных количеств энергии в атмосферу из-за конденсации водяного пара на ионах. Следует отметить, что LHF демонстрирует большую и асимметричную суточную вариацию около $15 \text{ Вт}/\text{м}^2$, которая достигает максимума около 6–7 UT и падает между 11 и 03 UT.

Скрытый тепловой поток и оптическая толщина аэрозоля

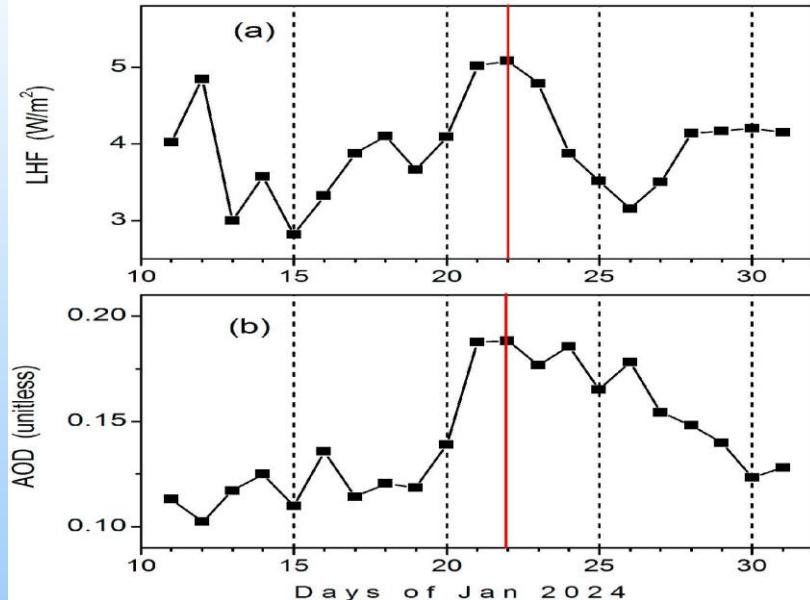


Рисунок 13. Временной ряд суточных значений (a) скрытого теплового потока и (b) АОТ с 11 января по 1 февраля. Оба параметра усреднены по 35° – 45° Н, 65° – 95° Е. День возникновения землетрясения обозначен красной линией

Это означает, что суточное усреднение доминирует в локальные полуденные часы. Имея в виду этот источник неопределенности, из рисунка 13а можно сделать вывод, что величина LHF, по-видимому, значительно больше в течение 3-дневного периода с центром в день землетрясения.

Наконец, рисунок 13б изображает эволюцию аэрозольной нагрузки над областью вокруг эпицентра. Оптическая глубина аэрозоля (AOD) — это степень, в которой аэрозоли препятствуют передаче света путем поглощения или рассеивания света. На рисунке 13б представлены 500 нм AOD, измеренные спутником MODIS-Terra и собранные в MERRA-2 в качестве дневных значений.

Видно, что AOD увеличилась с 0,12 19 января до 0,19 21 января. Этот рост затем постепенно затухает в течение нескольких дней. Поведение АОД подтверждает увеличение количества аэрозольных частиц, которое произошло одновременно с интенсивной конденсацией водяного пара и увеличением потока скрытого тепла.

Скрытый тепловой поток и оптическая толщина аэрозоля

Обсуждение

Согласно модели связи литосферы, атмосферы и ионосферы (LAIC), аномалии предвестников землетрясений вызваны усиленной эмиссией радона, ионизацией, гидратацией ионов, заряженными кластерами, образованием и релаксацией аэрозолей и турбулентностью воздуха, которая переносит аэрозоли вверх. Инжекция заряженных аэрозолей в атмосферу обеспечивает носители для внешнего электрического тока и генерации вертикального электрического поля вблизи поверхности Земли.

Проникая на высоты ионосферы, где проводимость относительно высока, это электрическое поле становится горизонтальным. При наличии геомагнитного поля, имеющего вертикальную составляющую, электрическое поле переносит плазму вверх или вниз.

Таким образом, космический аппарат, летящий на определенной высоте, может обнаруживать изменения плотности плазмы.

Были проведены различные тематические исследования и статистические анализы в попытке доказать феноменологическую цепочку LAIC.

Оценка Е- поля, вызывающего ионосферные неоднородности над зоной землетрясения

Наочной стороне Земли плотность ионосферной плазмы более чувствительна к возможному сигналу несолнечного происхождения. Сравнение двух временных рядов плотностей плазмы, измеренных приборами LP на борту спутников Swarm, летящих бок о бок на расстоянии ~ 150 км над областью сильного землетрясения в Центральной Азии в 23 UT, выявило значительную разницу в Ne.

SwC, летевший первым, обнаружил более высокие значения Ne вдоль траектории, в то время как второй спутник (SwA) обнаружил падение примерно на $1,5 \times 10^4$ эл/см³

Оценка Е-поля, вызывающего ионосферные неоднородности над зоной землетрясения

Сравнение с другими проходами показало, что разница в плотности плазмы была максимальной в день основных толчков и афтершоков. Эта пространственно локализованная ионосферная аномалия объясняется косейсмическим эффектом.

Существуют две основные возможности образования мелких или средних ионосферных неоднородностей, подобных наблюдаемым. Первая возможность — это подъем или опускание слоя F, а вторая — дрейф плазменных неоднородностей в горизонтальной плоскости.

Любой перенос плазмы подразумевает наличие усиленного электрического поля в ионосфере. В частности, электрические поля, направленные на восток (на запад), будут конвектировать среднеширотную ионосферу вверх (вниз).

Быстрые изменения в ионосфере также могут быть связаны с TID, которые являются проявлениями атмосферных гравитационных волн (AGW), возникающих, среди прочего, из-за землетрясений. Однако, поскольку высота орбиты Swarm находится выше пика слоя F2, косейсмические сигнатуры TID вряд ли можно наблюдать напрямую.

В рамках концепции LAIC резкие изменения Ne на высотах ионосферы могут быть вызваны интенсивными возмущениями Е-полей, исходящими от земли. Для изменения плотности плазмы $1,5 \times 10^4$ эл/см³ оценка вертикального смещения плазмы с использованием модели International Reference Ionosphere (IRI) дает разницу высот $\Delta h \sim 30$ км.

Klimenko, M.V.; Klimenko, V.V и др. (2008) исследовали зональные и вертикальные дрейфы динамо возмущений в низких/средних широтах, связанные с электрическими полями быстрого проникновения во время бури, которые возникают в высоких широтах.

Наблюдения показали, что временные вариации высоты ночного слоя F могут достигать десятков километров под воздействием Е-полей около 0,5–1 мВ/м. Эти оценки можно сравнить со значениями, полученными из наблюдений Swarm 22 января. Цепочка выглядит следующим образом: $\Delta Ne \sim 1,5 \times 10^4$ эл/см³, $\Delta h \sim 30$ км, $E \sim 0,5$ мВ/м. На широте 45° скорость вертикального дрейфа $E \times B$ составляет порядка 10 м/с, поэтому плазме требуется около часа, чтобы подняться на 30 км.

Оценка E- поля, вызывающего ионосферные неоднородности над зоной землетрясения

Пикообразный рисунок возмущения Ne, наблюдаемый тандемом Swarm 22 января, качественно согласуется с модельными предсказаниями. Согласно модели, предложенной

Pulinets, S.A.; Boyarchuk (2004) горизонтальное распределение возмущенной плотности плазмы в F-области делится на области повышенной и пониженной концентрации. Обе области смещаются к экватору с увеличением высоты.

Код моделирования ионосферы SAMI3, используемый для изучения вариаций TEC, вызванных электрическим полем от поверхностных зарядов зоны разлома землетрясения, также продемонстрировал расщепление [De Santis, A.; Balasis, G.; 2017].

Эти авторы обнаружили, что усиление (уменьшение) плотности плазмы происходило на западной (восточной) стороне от эпицентра. Модели и наблюдения показывают, что эффективность проникновения электрического поля ночью выше, чем днем, что сильно зависит от размера локализации вертикального электрического поля на уровне земли.

Аномалии Ne, наблюдаемые спутником Swarm, произошли точно в день главного толчка и серии афтершоков. *Статистические и тематические исследования убедительно продемонстрировали, что предсейсмические сигналы могут быть обнаружены в ионосфере над зоной подготовки землетрясения в течение нескольких дней или даже месяцев.*

Однако в нашем конкретном случае не было обнаружено никаких соответствующих аномалий в течение предшествующего периода разумной продолжительности. В относительно долгосрочной временной шкале кажется довольно сложным отличить косейсмические ионосферные аномалии от ионосферной изменчивости из-за переменных условий космической погоды.

Кроме того, остается открытым вопрос о том, почему предсейсмический сигнал исчезает на некоторое время и не превращается непрерывно в косейсмический сигнал. Мы считаем, что большое глобальное увеличение Ne с $\sim 0,5 \times 10^5$ (типичный уровень для близких дней) до примерно $1,5 \times 10^5$ эл/см³, наблюдаемое обоими спутниками 22 января (рисунок 8), не может считаться сейсмоиндуцированной сигнатурой.

О механизме ко-сейсмических эффектов в нижней атмосфере

К сожалению, серия умеренных солнечных вспышек, сопровождавшихся рентгеновскими и солнечными протонными потоками, произошла непосредственно перед и после главного сейсмического толчка. Солнечное излучение увеличило скорость ионизации и количество плазмы в ионосфере.

В то же время геомагнитные индексы (которые обычно используются для определения периодов геомагнитного спокойствия, подходящих для поиска пред- или косейсмических аномалий в ионосфере) остались почти неизменными.

Это связано с тем, что возмущение SW) было слабым, и, таким образом, ионосферные авроральные электроджеты и кольцевой ток (электрические токи, которые отвечают за наземные геомагнитные возмущения) не были затронуты.

В этой связи мы отмечаем, что существует идея, что возмущения космической погоды могут играть роль в возникновении землетрясений. Имеются некоторые доказательства такой связи, хотя и с длительной временной задержкой между геомагнитной бурей и сейсмическим событием, представлены в [Ouzounov, D.; Khachikyan, 2024]. Другая идея, подкрепленная численным моделированием, заключается в том, что солнечные вспышки могут вызывать изменения плотности теллурических токов в разломах земной коры, способные вызывать землетрясения.

О механизме ко-сейсмических эффектов в нижней атмосфере

Помимо аномалий, наблюдаемых в плотности ионосферной плазмы над зоной сейсмической подготовки, сейсмичность может проявляться в ко-локализованных возмущениях метеорологических параметров. Основной фактор, приводящий к генерации электромагнитных аномалий в ионосфере, связан с изменением проводимости столба воздуха, особенно на пограничных слоях между атмосферой и ионосферой.

При движении тектонических плит в предземлетрясительный период выделяется значительное количество радона и его дочерних веществ (торон и т.п.). Распад, сопровождающийся выбросом энергичных α -частиц, может приводить к ионизации воздуха и образованию ионных кластеров в нижней тропосфере. При турбулентной диффузии радон может достигать высоты 1 км.

О механизме ко-сейсмических эффектов в нижней атмосфере

В результате химических реакций и прилипания молекул к ионным кластерам образуются крупные заряженные частицы, на которых конденсируется водяной пар, что приводит к снижению относительной влажности и выделению скрытой теплоты испарения.

Таким образом, механизм ионизации воздуха, вероятно, лежит в основе тропосферных аномалий, наблюдавшихся в случае исследуемого землетрясения. В частности, удельная влажность падает на ~30%, а скрытая теплота и АОТ увеличиваются на ~25% и 80% соответственно.

Ионосферные и метеорологические аномалии появились в районе землетрясения практически одновременно, хотя аномалии метеопараметров начали расти за 1–2 дня до основного сейсмического толчка и достигли пика в день толчка. Тропосферная реакция может быть связана с повышенной эманацией радона перед землетрясением в течение относительно короткого периода, предшествующего толчку.

Время затухания метеопараметров также составляет около 1–2 дней, вероятно, из-за инерции атмосферы и относительно медленной релаксации. Ионосферная аномалия, по-видимому, была короче тропосферной аномалии из-за связи с электромагнитным сигналом, в то время как метеоаномалии включают химические и динамические процессы.

С точки зрения модели LAIC, вариации радона являются основным источником изменений атмосферного электричества за несколько дней до сильных землетрясений.

Следует учитывать, что возможные ко-сейсмические аномалии могут быть скрыты сигнатурой атмосферных волн. Кроме того, возможность обнаружения определенных атмосферных аномалий из-за повышенной ионизации зависит от общих метеорологических условий в сейсмической зоне.

Во время дождя, снега, тумана, сильного ветра или облаков соответствующие возмущения во много раз превышают возможный косейсмический сигнал.

Однако для изучаемого здесь землетрясения по данным Всемирной службы погоды, в конце января 2024 года в районе эпицентра землетрясения в Центральной Азии в течение довольно длительного периода стояла хорошая погода, и никаких экстремальных условий не наблюдалось.

Резюме и выводы

Резюме и выводы

Анализ возмущений плотности плазмы вдоль траекторий спутников Swarm над районом сильного землетрясения в Синьцзяне ($M_w = 7$) 22.01.2024 г. выявил несколько дополнительных особенностей, которые, вероятно, связаны с генерацией и проникновением ко-сейсмического электрического поля в ионосферу.

Землетрясение произошло в течение длительного периода геомагнитного спокойствия. Через несколько часов после главного толчка tandem спутников SwC и SwA пересек область землетрясения для орбиточной стороны и наблюдал мелкомасштабную аномалию в плотности плазмы.

В данным наблюдений двух спутников, аномалия начала развиваться над эпицентром за день до землетрясения и достигла максимума в день главного толчка и афтершоков. Мы предполагаем, что наблюдаемая неравномерность является признаком косейсмического электрического поля, проникающего в ионосферу из-за дополнительной ионизации воздуха над эпицентром и повышенной проводимости воздушного столба.

Наблюдаемая цепочка ионосферных и тропосферных аномалий согласуется с концепцией LAIC. Величина и форма наблюдаемой ионосферной неравномерности, по-видимому, согласуются с *прогнозами «оптимистических» моделей, представляющих концепцию связи литосферы, атмосферы и ионосферы с точки зрения электродинамических, химических и тепловых процессов*.

22 января 2024 г. локальная ко-сейсмическая аномалия была обнаружена на фоне глобального увеличения плотности плазмы из-за солнечных вспышек и связанного с этим усиления потоков рентгеновского излучения и протонов, что повлияло на скорость ионизации, распределение ПЭС и проводимость воздуха.

Важно отличать специфические, относительно низкоамплитудные аномалии ко-сейсмического происхождения от внутри ионосферной изменчивости, даже если геомагнитные условия спокойные.

Ионосферная аномалия согласуется с одновременно наблюдаемыми возмущениями метеорологических параметров в области землетрясения. Удельная влажность, поток скрытого тепла и оптическая толщина аэрозоля демонстрируют ко-локализованные возмущения, которые можно отнести к эффекту повышенных скоростей ионизации тропосферного воздуха, что приводит к большей электропроводности в приземном пограничном слое.

Резюме и выводы

За день до землетрясения эманация радона и его последующий распад, связанный с подготовкой сейсмического события, вызвали локальное падение влажности и выраженное усиление скрытого теплового потока и АОД.

Таким образом, крупное землетрясение, произошедшее 22.01.2024 г. представляет собой всеобъемлющий пример сложной реакции геосфера на сейсмическую активность. Наблюдения подтверждают цепочку элементов, включенных в LAIC через электромагнитные процессы, что, в свою очередь, является частью теории GEC (Глобальной электрической цепи). Наиболее выраженные возмущения сейсмического происхождения произошли в день землетрясения, и некоторые признаки можно заметить за день до этого.

Библиография

1. Pulinets, S.A.; Boyarchuk, K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*; Springer: Berlin, Germany, 2004; 288p.
2. De Santis, A.; Marchetti, D.; Spogli, L.; Cianchini, G.; Pav'on-Carrasco, F.J.; De Franceschi, G.; Di Giovambattista, R.; Perrone, L.; Qamili, E.; Cesaroni, C.; et al. Magnetic field and electron density data analysis from Swarm satellites searching for ionospheric effects by great earthquakes: 12 case studies from 2014 to 2016. *Atmosphere* **2019**, *10*, 371. [\[CrossRef\]](#)
3. Parrot, M.; Tramutoli, V.; Liu, T.J.Y.; Pulinets, S.; Ouzounov, D.; Genzano, N.; Lisi, M.; Hattori, K.; Namgaladze, A. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* **2021**, *230*, 197–225. [\[CrossRef\]](#)
4. Lukianova, R.; Christiansen, F. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents. *J. Geophys. Res.* **2006**, *111*, A03213. [\[CrossRef\]](#)
5. Li, M.; Shen, X.; Parrot, M.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Yu, C.; Yan, R.; Liu, D.; Lu, H.; Guo, F.; et al. Primary Joint Statistical Seismic Influence on Ionospheric Parameters Recorded by the CSES and DEMETER Satellites. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **2020**, *125*, e2020JA028116. [\[CrossRef\]](#)
6. De Santis, A.; Abbattista, C.; Alfonsi, L.; Amoruso, L.; Campuzano, S.A.; Carbone, M.; Cesaroni, C.; Cianchini, G.; De Franceschi, G.; De Santis, A.; et al. Geosystemics View of Earthquakes. *Entropy* **2019**, *21*, 412. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. He, Y.; Zhao, X.; Yang, D.; Wu, Y.; Li, Q. A study to investigate the relationship between ionospheric disturbance and seismic activity based on Swarm satellite data. *Phys. Earth Planet. Inter.* **2022**, *323*, 106826. [\[CrossRef\]](#)
8. Haralambous, H.; Paul, K.S. Travelling Ionospheric Disturbance Direction of Propagation Detection Using SwarmA-C In-Situ Electron Density. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 897. [\[CrossRef\]](#)
9. Arras, C.; Wickert, J.; Beyerle, G.; Heise, S.; Schmidt, T.; Jacobi, C. A global climatology of ionospheric regularities derived from GPS radio occultation. *Geophys. Res. Lett.* **2008**, *35*, L14809. [\[CrossRef\]](#)
10. Lukianova, R.; Uvarov, V.M.; Coisson, P. High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions. *Adv. Space Res.* **2017**, *59*, 557–570. [\[CrossRef\]](#)
11. Namgaladze, A.; Karpov, M.; Knyazeva, M. Aerosols and seismo-ionosphere coupling: A review. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **2018**, *171*, 83–93. [\[CrossRef\]](#)
12. Pulinets, S.; Khachikyan, G. The Global Electric Circuit and Global Seismicity. *Geosciences* **2021**, *11*, 491. [\[CrossRef\]](#)
13. Sori, T.; Shinbori, A.; Otsuka, Y.; Nishioka, M.; Perwitasari, S. Dependence of ionospheric responses on solar wind dynamic pressure during geomagnetic storms using global long-term GNSS-TEC data. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **2023**, *128*, e2022JA030913. [\[CrossRef\]](#)

Библиография

14. Dobrovolsky, I.; Zubkov, S.; Miachki, V. Estimation of the size of earthquake preparation zone. *Pure Appl. Geophys.* **1979**, *117*, 1025–1044. [[CrossRef](#)]
15. Kuo, C.L.; Lee, L.C.; Huba, J.D. An Improved Coupling Model for the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere System. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **2014**, *119*, 3189–3205. [[CrossRef](#)]
- 16.. Alken, P.; Thébault, E.; Beggan, C.D.; Amit, H.; Aubert, J.; Baerenzung, J.; Bondar, T.N.; Brown, W.J.; Califf, S.; Chambodut, A.; et al. International Geomagnetic Reference Field: The Thirteenth Generation. *Earth Planets Space* **2021**, *73*, 49. [[CrossRef](#)]
17. Kelley, M.C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed.; Academic Press: Burlington, MA, USA, 2009; Volume 96, pp. 267–342.
18. Spogli, L.; Jin, Y.; Urbář, J.; Wood, A.G.; Donegan-Lawley, E.; Clausen, L.; Shahtahmassebi, G.; Alfonsi, L.; Rawlings, J.T.; Cicone, A.; et al. Statistical models of the variability of plasma in the topside ionosphere: 2. Performance assessment. *J. Space Weather. Space Clim.* **2024**, *14*, 4. [[CrossRef](#)]
19. Gelaro, R.; McCarty, W.; Suárez, M.J.; Todling, R.; Molod, A.; Takacs, L.; Randles, C.A.; Darmenov, A.; Bosilovich, M.G.; Reichle, R.; et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version-2 (MERRA-2). *J. Clim.* **2017**, *30*, 5419–5454. [[CrossRef](#)]
20. Denisenko, V.V.; Boudjada, M.Y.; Horn, M.; Pomozov, E.V.; Biernat, H.K.; Schwingenschuh, K.; Lammer, H.; Prattes, G.; Cristea, E. Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2008**, *8*, 1009–1017. [[CrossRef](#)]
- Ampferer, M.; Denisenko, V.V.; Hausleitner, W.; Krauss, S.; Stangl, G.; Boudjada, M.Y.; Biernat, H.K. Decrease of the electric field penetration into the ionosphere due to low conductivity at the near ground atmospheric layer. *Ann. Geophys.* **2010**, *28*, 779–787. [[CrossRef](#)]
21. Hayakawa, M.; Molchanov, O. Seismo-Electromagnetics (Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling);
23. Nicoll, K.; Harrison, R.; Barta, V.; Bor, J.; Brugge, R.; Chillingarian, A.; Chum, J.; Georgoulis, A.; Guha, A.; Kourtidis, K.; et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **2019**, *184*, 18–29. [[CrossRef](#)]
24. Sorokin, V.; Hayakawa, M. Generation of seismic-related DC electric fields and lithosphere atmosphere-ionosphere coupling. *Modern Appl. Sci.* **2013**, *7*, 1–25. [[CrossRef](#)]
25. Ouzounov, D.; Khachikyan, G. Studying the Impact of the Geospace Environment on Solar Lithosphere Coupling and Earthquake Activity. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 24. [[CrossRef](#)]

Благодарю за внимание!

Thank you for your attention!

Назарларыңызға рахмет!