

УДК 550.837: 551.524: 550.34

АНОМАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМНОЙ КОРЫ И ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

Л.Г. Свєрдлик

Представлены результаты анализа временной динамики температуры верхней тропосферы и короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления, характеризующих изменения напряженно-деформационного состояния земной коры. Показано наличие корреляции аномальных возмущений параметров с региональными и удаленными землетрясениями. Исследована изменчивость интегральной мощности флуктуаций электросопротивления в сопоставлении с сейсмической активностью. Выявлена связь данных электромагнитного зондирования с длиннопериодными вариациями индексов геомагнитной активности.

Ключевые слова: землетрясения; земная кора; электроимпульсное зондирование; удельное электрическое сопротивление; спутниковые данные; атмосфера; температура; аномалии; геомагнитная активность.

АТМОСФЕРАНЫН ТЕРМИКАЛЫК АБАЛЫНЫН ЖАНА ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН ЭЛЕКТРИК МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮНҮН АНОМАЛДЫК ӨЗГӨРҮҮЛӨРҮ

Бул макалада жогорку тропосферанын температурасынын мезгилдүү динамикасын жана жер кыртышынын абалын мүнөздөөчү салыштырма электр каршылыгынын кыска мөөнөттүү өзгөрүүлөрүн талдоонун жыйынтыктары көрсөтүлдү. Аймактык жана алыскы жер титирөөлөр менен параметрлердин аномалдык өзгөрүүлөрүнүн ортосундагы корреляция байланышы көрсөтүлдү. Сейсмикалык активдүүлүк менен салыштырууда электр каршылыгынын флуктуацияларынын интегралдык кубаттуулугунун өзгөрүүсү изилденди. Геомагниттик активдүүлүк индексинин узак мөөнөттүү өзгөрүүлөрү менен электромагниттик изилдөөнүн маалыматтарынын байланышы аныкталды.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө, жер кыртышы, электримпульстук изилдөө, салыштырма электр каршылыгы, спутниктик маалыматтар, атмосфера, температура, аномалиялар, геомагниттик активдүүлүк.

ANOMALOUS VARIATIONS OF EARTH CRUST ELECTRICAL CHARACTERISTICS AND THERMIC STATE OF ATMOSPHERE

L.G. Sverdlik

The article presents the results of analysis of temporal dynamics of upper troposphere temperature and short-period variations of specific resistance characterizing changes in stress-strain state of the earth's crust. The correlation of anomalous parameter perturbations with regional and remote earthquakes is shown. Variability of integrated power of electric resistance fluctuations spectra is compared with seismic activity. Relationship of electromagnetic sensing data with long-period variations of geomagnetic activity indices is revealed.

Keywords: earthquake; Earth's crust; electropulse sensing; resistivity; satellite data; atmosphere; temperature; anomalies; geomagnetic activity.

Введение. Сложный процесс динамики земной коры в периоды подготовки сильных землетрясений, особенно на его финальной стадии, сопровождается проявлением многочисленных геодинамических, геохимических, метеорологических и электромагнитных аномалий в различных геосферах. Это приводит к необходимости развития идеи многопараметрического подхода при монито-

ринге предвестников землетрясений [1], который может быть обеспечен на основе комплексного использования результатов наземных геофизических измерений и экспериментальных данных, полученных с применением космических технологий. Из числа методов, используемых при решении задачи прогноза землетрясений, широкое применение получил электромагнитный и геомагнитный

мониторинг вариаций электрических и магнитных характеристик земной коры, сопровождающих активизацию напряженно-деформационных полей, как правило предшествующих сильным землетрясениям [2, 3]. В то же время исследования пространственно-временной структуры различных параметров атмосферы показали, что тепловые аномалии перед сильными землетрясениями отмечались на разных уровнях, начиная от поверхности земли до верхней границы облаков, и неоднократно регистрировались многими исследователями [1].

Особый интерес в этом отношении представляет область высот в зоне раздела тропосферы и стратосферы, которая чувствительна к воздействию различных возмущающих факторов [4], включая акустические колебания – внутренние гравитационные волны, возникновение которых может быть вызвано как метеорологическими явлениями, так и сейсмической активностью. Это определяет потенциальную возможность использования данных спутниковых измерений применительно к выявлению литосферно-атмосферной связи.

Исходя из этого, результаты мониторинга кажущегося удельного сопротивления земной коры по методу зондирования становлением поля в дальней зоне (ЗСД) и спутниковые данные о вариациях температуры на изобарических уровнях в зоне раздела тропосферы и стратосферы были сопоставлены с сейсмической активностью в регионе.

Используемые данные. Электросопротивление является весьма чувствительным параметром, реагирующим на изменение напряженного состояния земной коры [3]. В качестве исходных данных использовали результаты наземных режимных электромагнитных наблюдений на стационарном пункте Аксу НС РАН в г. Бишкеке, которые проводили ежедневно, кроме выходных и праздничных дней. Среднесуточные значения удельного электрического сопротивления (ρ_r) вычисляли на основе проведенных за день сеансов зондирования с использованием импульсного контролируемого источника ЭРГУ-600-2. Необходимое для последующей обработки восстановление непрерывных временных рядов среднесуточных значений $\rho_r(t)$ выполнено кусочно-полиномиальной интерполяцией кубическими сплайнами. Пробелы в экспериментальных данных были заполнены результатами интерполяции.

Из обширного набора спутниковых данных в качестве ключевого параметра, который определяет условия протекания большинства динамических процессов в атмосфере, была выбрана ее термическая структура. Непрерывные временные серии температуры $T(t)$ были восстановлены на 10 изобарических уровнях (p_k) от 500 до 70 hPa

над участком размером $\pm 1^\circ$ от точки проведения электромагнитных измерений [5]. Исходные температурные ряды спутниковых измерений с 3-х часовым разрешением по времени были приведены (для соответствия наземным данным) к шагу дискретизации по времени, составляющему $\Delta t = 24$ h.

Сведения о сейсмических событиях взяты из каталога землетрясений [6], составленного по данным сейсмологической сети *KNET*, а также на интерактивном сервисе *IEB (IRIS)* [7]. Региональные землетрясения выбирали в диапазоне энергетических классов $K > 11.0$ (или $M \geq 3.8$), а магнитуды удаленных событий превышали $M \geq 5.5$. Эпицентры последних располагались в пределах $\pm 10\text{--}15^\circ$ ($\sim 1000\text{--}1500$ km) от пункта электромагнитного мониторинга (42.60 N°; 74.01 E°): в Афганистане (22.11.2014; $M = 5.5$; 36.57 N; 66.52 E), (09.09.2015; $M = 5.5$; 36.01 N; 70.49 E) и (26.10.2015; $M = 7.5$; 36.52 N; 70.37 E); Пакистане (26.02.2015; $M = 5.5$; 34.67 N; 73.28 E), Непале (25.04.2015; $M = 7.8$; 28.23 N; 84.73 E) и (12.05.2015; $M = 7.3$; 27.82 N; 86.08 E); Китае (10.01.2015; $M = 5.5$; 40.15 N; 77.11 E); Таджикистане (07.12.2015; $M = 7.5$; 38.21 N; 72.78 E), (25.12.2015; $M = 6.3$; 36.49 N; 71.13 E), (18.03.2016; $M = 5.6$; 38.02 N; 72.41 E) и (26.06.2016; $M = 6.4$; 39.48 N; 73.34 E); на севере Ирана (05.04.2017; $M = 6.1$; 35.80 N; 60.44 E).

Обработка данных

Удельное электрическое сопротивление. Полученные в результате применения интерполяции непрерывные временные ряды удельного электрического сопротивления $\rho_r(t)$ содержат как длиннопериодные, так и короткопериодные информативные составляющие. Нестационарные крупномасштабные (низкочастотные, с периодами от 14.1 до 341,0 суток) компоненты $\rho_r(t)$ связаны, вероятно, как с локальными изменениями геоэлектрических характеристик исследуемой толщи земной коры, так и с глобальными геомагнитными процессами. Короткопериодные вариации ($T = 2.3\text{--}9.0$ суток) характеризуются, как правило, малой амплитудой ($\sim 2\text{--}20$ Ом*м или порядка 2–10 %) и состоят из двух главных составляющих. Первая – обусловленные различными случайными факторами флуктуации в пределах доверительного интервала, определяемого двойным среднеквадратичным отклонением ($\pm 2\sigma$), представляющие собой естественную изменчивость, не выходящую за пределы среднемесячных значений. Вторая – всплески или аномальные вариации удельного электрического сопротивления вне пределов $\pm 2\sigma$, которые можно считать аномальными и анализировать положительные и отрицательные отклонения от средних значений на предмет связи с сейсмической активностью:

$$\rho_r^* - 2\sigma > \rho_{rA} > \rho_r^* + 2\sigma.$$

Одним из универсальных методов при решении задачи выделения во временном ряду флуктуационной компоненты ($\Delta\rho_r$), является использование “скользящего окна”, фактически означающего применение низкочастотной фильтрации. Аномальные флуктуации $\rho_{rA}(x, y, t_i)$ для каждого текущего значения $\rho_r(x, y, t_i)$ определяли по отношению к среднему (невозможному) уровню и среднеквадратичному отклонению в смещаемом на 1 сутки временном окне (m) шириной ± 30 суток:

$$\begin{aligned} \Delta\rho_r(x, y, t) &= \\ &= \rho_r(x, y, t_i) - 1/m \sum_{j=1}^m \rho_r(x, y, t_j) = \\ &= \rho_r(x, y, t_i) - \langle \rho_r^*(x, y, t_j) \rangle, \\ \rho_{rA}(x, y, t) &= \Delta\rho_r(x, y, t) / \sigma(x, y, t), \end{aligned}$$

где x и y – координаты пункта мониторинга.

Температура атмосферы. Обобщение результатов исследований особенностей вариаций температуры атмосферы в сейсмически активных регионах Азии [8] позволило выявить связь между сильными сейсмическими событиями и аномальными возмущениями в свободной тропосфере (ΘT_{FT}) и над тропопаузой (ΘT_{TP}), характеризующимися противофазными колебаниями $T(t)$ вследствие различия поведения градиента температуры ($\gamma_{FT} = \Delta T / \Delta p < 0$; $\gamma_{TP} = \Delta T / \Delta p > 0$). Эта особенность поведения температуры в рассматриваемой области высот была использована при разработке методики диагностирования аномалий температуры, основанной на расчетах произведения скользящих дисперсий временных рядов: $\Theta T(t): D(t) = D(\Theta T_{FT}(t)) \times D(\Theta T_{TP}(t))$, которое позволяет определять моменты согласованного возникновения возмущений в обоих слоях [9], а также оценить временные интервалы их проявления. В отличие от приведенной в [8, 9] методики расчета параметра $D(t)$, в настоящей работе определялся обобщенный показатель вариаций D^* . Вычисления производили с использованием модифицированного алгоритма, являющегося итерационной процедурой, которая состоит из нескольких шагов. Перед началом вычисления устанавливали систему изобарических уровней p_{ki} ($i = 1, \dots, n$) в области тропопаузы. После того, как временные средние были удалены из исходных данных, и проведены расчеты $\langle D(\Theta T_{FT}) \rangle$ $\langle D(\Theta T_{TP}(p_{ki})) \rangle$, инициировали процедуру вычисления:

$$D^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \langle D_{FT}^{\Theta T} \rangle \times D_{TP}^{\Theta T}(p_{ki}).$$

В качестве объективного критерия при выборе граничного уровня аномального изменения температуры служит, как установлено экспериментально, $D^* > 1.5$.

Сопоставление результатов измерений $\rho_r(t)$ с сейсмическим режимом. Пример сопоставления результатов электромагнитных и сейсмических наблюдений за период с апреля 2014 г. по сентябрь 2017 г. приведен на рисунке 1. Показаны временные ряды короткопериодных флуктуаций удельного электрического сопротивления ($\Delta\rho_r$) и сглаженные графики $\langle \rho_r(t) \rangle$ для времени становления поля $t^* = 3.14$ с, которые соответствуют поздней стадии становления электромагнитного поля и в данном случае представляются более информативными с точки зрения соответствия большей глубине проникновения поля переходных процессов. Эти данные совмещены с отмеченными соответствующими маркерами моментами наиболее сильных региональных ($K > 11.0$, *KNET*) землетрясений и более удаленных сейсмических событий ($M > 5.5$, *IRIS*).

В поведении удельного электрического сопротивления наблюдались достаточно многочисленные аномальные вариации (ρ_{rA}), отражающие, вероятно, быстрые изменения поля механических напряжений, связанных с региональной и глобальной динамикой деформационных процессов. Наблюдалась синхронизация ρ_{rA} как с наиболее сильными региональными, так и с удаленными событиями, которые происходили после резких перепадов удельного электрического сопротивления. Причем очевидная закономерность заключается в том, что наиболее выраженные аномальные изменения ρ_{rA} коррелировали с удаленными событиями, сейсмическая энергия которых выше на несколько порядков. Так, например, аномалии ρ_{rA} , наблюдаемые в апреле–мае 2015 г., не были отмечены сколь-нибудь заметными региональными землетрясениями. Высока вероятность, что они связаны с сериями удаленных крупных событий в Непале магнитудой $M = 6.6-7.8$ и $M = 6.3-7.3$, произошедшими 25–26 апреля и 12 мая 2015 г., соответственно.

Таким образом, воздействия удаленных сильных сейсмических событий ($M \geq 5.5$) являются отдельным фактором, влияющим на характер и уровень деформаций и напряженного состояния земной коры в исследуемом регионе. Не исключая и возможные проявления значительных флуктуаций удельного электросопротивления, вследствие наложения процессов подготовки отдельных региональных и удаленных событий.

Спектральный и корреляционный анализ временных рядов удельного электрического сопротивления. Анализ частотно-временных характеристик флуктуаций $\rho_r(t)$ выполняли с применением аппарата вейвлет-преобразований. Для спектрального анализа полученных временных реализаций удельного электрического сопротивления был использован пакет *AutoSignal* [10],

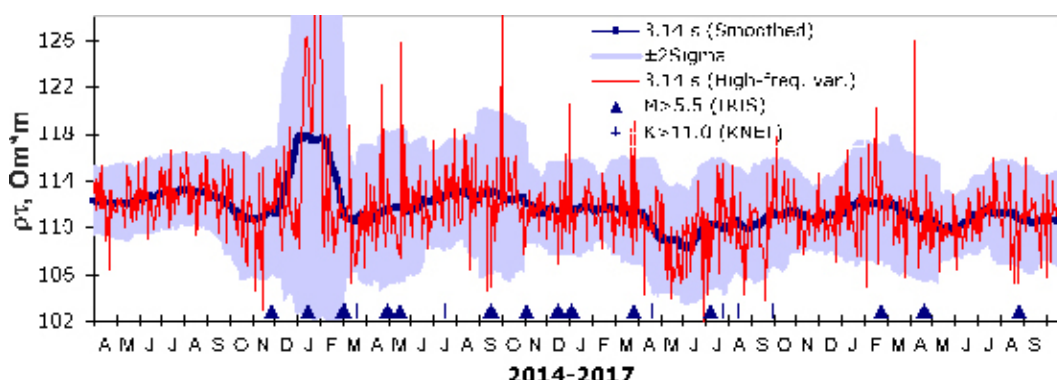


Рисунок 1 – Вариации средних значений ($\pm 2\sigma$) и высокочастотной составляющей удельного сопротивления ($t^* = 3.14$ с) с апреля 2014 г. по сентябрь 2017 г., совмещенные с сейсмическими данными (KNET и IRIS)

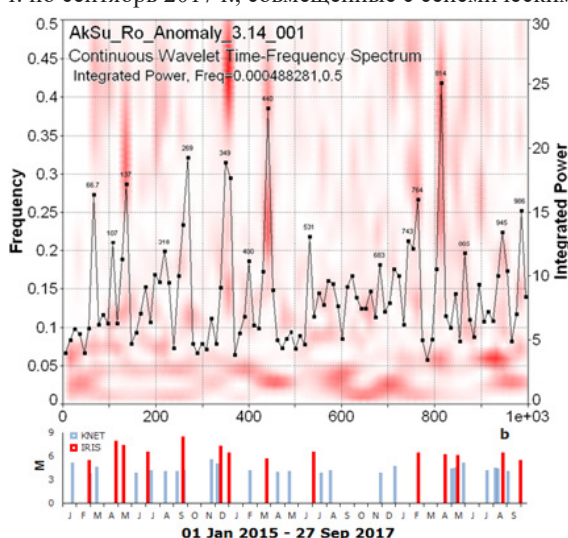


Рисунок 2 – Суточная динамика интегральной мощности и спектра высокочастотных вариаций $\rho_{\tau}(t)$ в различные моменты времени (а) и магнитуды наиболее сильных землетрясений (б) с 01.01.2015 по 27.09.2017 г.

который позволяет наглядно оценивать параметры и динамику изменения отдельных составляющих спектра короткопериодных флуктуаций $\rho_{\tau}(t)$. Частотно-временная диаграмма, представленная на рисунке 2, свидетельствует о наличии хорошо выраженных периодичностей в пределах от ~ 2 до ~ 30 суток.

На графике временного распределения интегральной мощности флуктуаций $\rho_{\tau}(t)$ наблюдаются всплески максимумов, соответствующие периодам $\sim 2-6$ суток, как вероятные признаки подготовки (отклики) сейсмических событий, проявляющиеся в изменениях кажущегося сопротивления. В то же время следует отметить, что сильные сейсмические события происходили, главным образом, в относительно короткие периоды устойчивой коррелированности ($R > 0.50$) изменений удельного электрического сопротивления при разных временах становления поля (3.14 и 0.56 с). Снижение степе-

ни неоднородности напряженно-деформированного состояния разных слоев земной коры, вероятно, может характеризовать процесс накопления дополнительной упругой энергии, заканчивающийся крупномасштабным разрывом [3].

Сопоставление наземных ($\rho_{\tau A}$) и спутниковых (D^*) данных. На рисунке 3 показаны нормированные графики изменения модулей вариаций удельного сопротивления $\rho_{\tau A}$ и интегрального параметра D^* в сопоставлении с произошедшими сейсмическими событиями.

Результаты, полученные с применением двух независимых методов измерения, свидетельствуют об определенном наличии общих характерных черт короткопериодных аномальных возмущений геофизических параметров в периоды подготовки рассматриваемых событий. В ряде случаев поведение параметров $\rho_{\tau A}$ и D^* еще нельзя назвать аномальным, но, тем не менее, флуктуации заметно

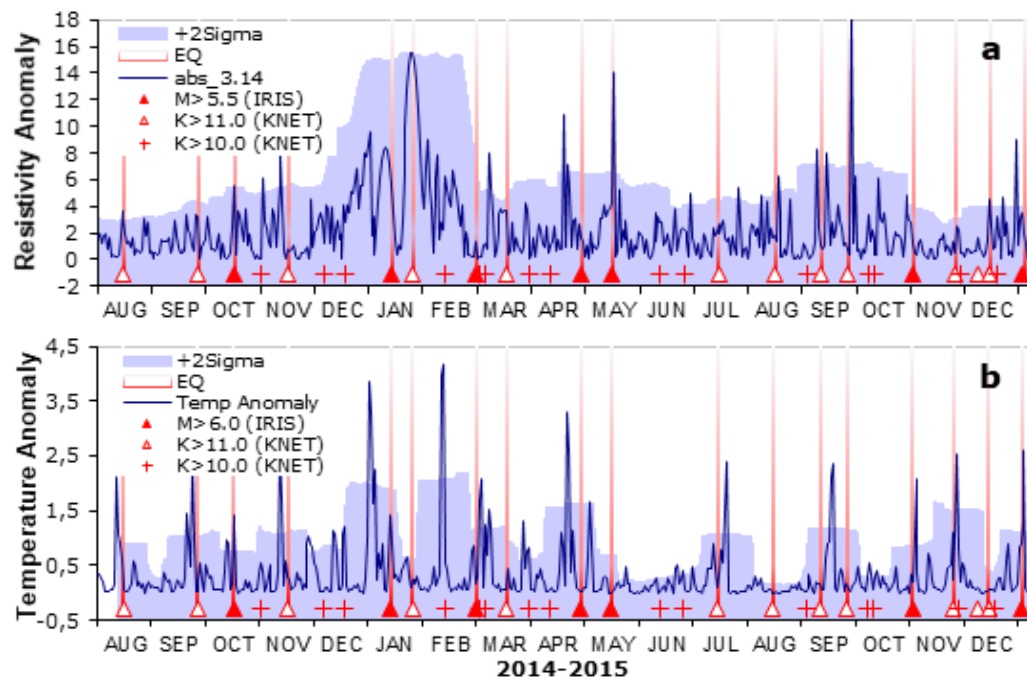


Рисунок 3 – Временные ряды модуля нормированных флуктуаций удельного сопротивления ρ_{rA} (a) и интегрального параметра D^* (b), совмещенные с сейсмическими данными (август 2014 г. – декабрь 2015 г.)

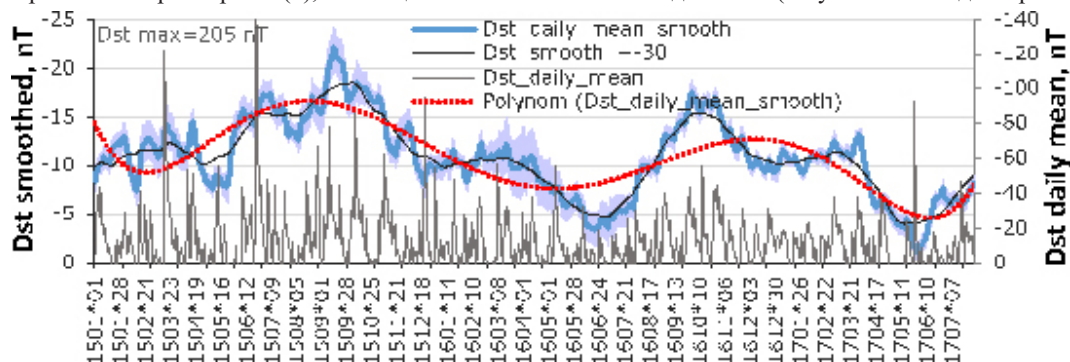


Рисунок 4 – Среднесуточные исходные и сглаженные временные окном ± 30 суток вариации индекса Dst в 2015–2017 гг. и полиномиальная аппроксимация геомагнитных данных

выражены. Несмотря на то, что прямой связи между величиной изменения параметров и энергией сейсмических волн не просматривалось, из 17 выделенных наиболее сильных землетрясений, произошедших с августа 2014 г. по декабрь 2015 г., только 12 % событий не сопровождалось аномальными изменениями кажущегося сопротивления и температуры. В качестве одной из возможных причин проявления эффекта когерентности в изменениях параметров могут рассматриваться геофизические процессы планетарного масштаба [11], в частности, магнитосферные возмущения.

Длиннопериодные вариации $\rho_r(t)$ и геомагнитная активность. Известно, что обусловленные

солнечной активностью возмущения влияют на самые разнообразные процессы во всех оболочках Земли, включая атмосферу и литосферу [12]. Интенсивность магнитосферных возмущений может быть оценена низкоширотным геомагнитным индексом Dst (nT), который определяется наземными измерениями магнитного поля на четырех экваториальных станциях для каждого часа мирового времени. Среднесуточные исходные и сглаженные временным окном ± 30 суток вариации геомагнитной активности по данным обсерватории Какиока Мирового центра Киото, Япония [13] с января 2015 г. по июль 2017 г. показаны на рисунке 4. В течение этого периода геомагнитная активность

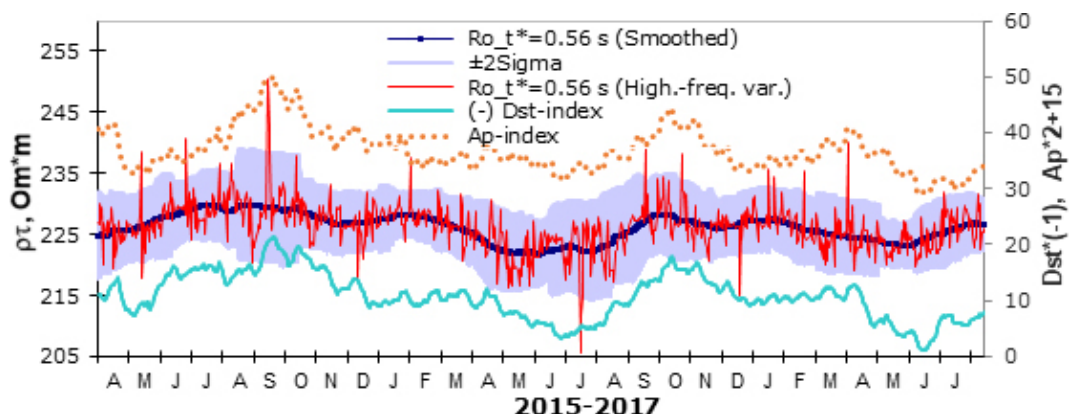


Рисунок 5 – Временные ряды среднесуточных значений высоко- и низкочастотной составляющей удельного сопротивления ($t^* = 0.56$ с), сглаженных кривых геомагнитных индексов Dst и Ap

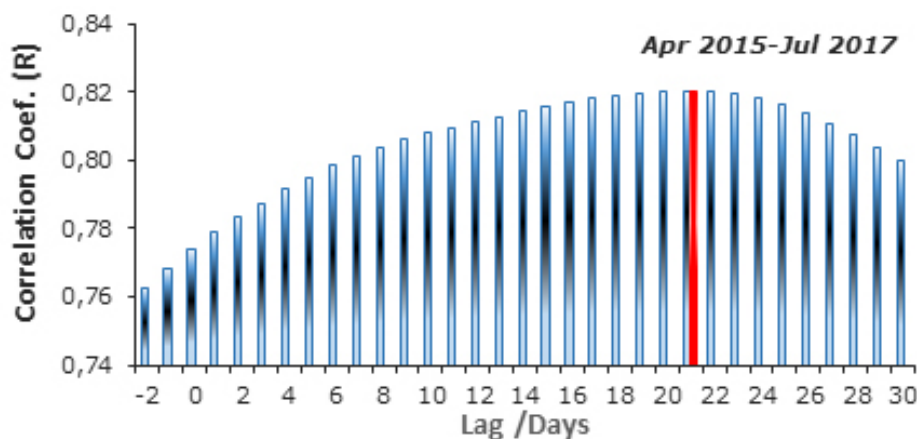


Рисунок 6 – Кросскорреляционная функция вариаций индекса Dst и удельного электрического сопротивления ($t^* = 0.56$ с) на станции Ак-Су

характеризовалась только несколькими случаями резкого понижения геомагнитного поля, связанными с состоянием межпланетной среды и описываемыми уровнями индекса Dst , выходящими за пределы -80 nT.

Результаты сравнения длиннопериодных вариаций возмущения магнитного поля (Dst) с данными электромагнитного зондирования $\langle \rho_r(t) \rangle$ и $\Delta \rho_r(t)$, дополненные сглаженным графиком индекса Ap , характеризующего глобальную возмущенность магнитного поля, приведены на рисунке 5. Как видно, временные зависимости $\langle \rho_r(t) \rangle$, $Dst(t)$ и $Ap(t)$ близки к идентичным, что позволяет предположить наличие связи между вариациями геомагнитного поля и деформационным процессом земной среды. Вместе с тем, заметно опережение $\langle \rho_r(t) \rangle$ по сравнению с изменениями индекса Dst .

Для определения сдвига временных серий $\langle \rho_r(t) \rangle$ и $Dst(t)$ друг относительно друга (лаг k) ис-

пользовали взаимную корреляционную функцию, которую определяли как коэффициент корреляции между X_t и Y_{t+k} в зависимости от k (где $X_t = Dst(t)$; $Y_t = \langle \rho_r(t) \rangle$). Влияние одного явления на другое, проявляющееся в запаздывании длиннопериодных вариаций Dst относительно $\langle \rho_r(t) \rangle$ на временной промежутке $k = \sim 21$ сутки, определяли по максимуму коэффициента корреляции, равного $R = 0.82$ (рисунок 6).

Одной из особенностей временного распределения $\Delta \rho_r(t)$, представленного на рисунке 5, является наличие высокочастотных всплесков аномально большой амплитуды, возникающих в моменты устойчивой смены знака приращений (градиента) индекса Dst (рисунок 6).

Заключение. Проанализированы аномальные короткопериодные вариации удельного электрического сопротивления и температуры атмосферы в области тропопаузы, характеризующие процессы,

протекающие в геосферах накануне сейсмического события. Методами спектрального анализа исследована структура многолетней изменчивости рядов высокочастотной компоненты среднесуточных значений электросопротивления. Временные ряды среднесуточных величин $\rho_r(t)$, аппроксимированные низкочастотными гармониками, показали наличие связи между вариациями геомагнитного поля и деформационным процессом в земной коре.

Приведенные результаты могут служить подтверждением очевидной корреляции аномалий наземных и спутниковых данных с локальными и удаленными сейсмическими событиями. Это позволяет сделать выводы, что, во-первых, метод температурного спутникового мониторинга может быть использован как эффективное дополнение к традиционным измерениям, в данном случае электрических параметров земной коры в поисках предвестников землетрясений. Во-вторых, космический мониторинг параметров атмосферы благодаря глобальности охвата и регулярности получения данных, представляет самостоятельный интерес с точки зрения установления взаимосвязи между процессами в литосфере и атмосфере перед крупными сейсмическими событиями.

Автор выражает благодарность сотрудникам *NASA GES-DISC* за обеспечение свободного доступа к данным.

Литература

1. Пулинец С.А. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера-Магнитосфера, инициируемых ионизацией / С.А. Пулинец, Д.П. Узунов, А.В. Карелин, Д.В. Давиденко // Геомагнетизм и Аэрономия. 2015. Том 55. № 4. С. 1–19.
2. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) / В.Д. Брагин // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. № 4. С. 46–53.
3. Вольхин А.М. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / А.М. Вольхин, В.Д. Брагин, А.В. Зубович и др. М.: Наука, 1993. 158 с.
4. Свердлик Л.Г. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.
5. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (Дата обращения 05.07.2018)
6. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
7. The IRIS Earthquake Browser. URL: <http://ds.iris.edu/> (Дата обращения 05.07.2018)
8. Свердлик Л.Г. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2016. Том 16. № 5. С. 170–174.
9. Свердлик Л.Г. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Журнал Сибирского федерального ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. Том 10. № 6. С. 783–793.
10. SeaSolve Software Inc. AutoSignal. Pioneering automated signal analysis and advanced filtering. Framingham. USA. 2003. 479 P.
11. Дещеревский А.В. Флуктуации геофизических полей и прогноз землетрясений / А.В. Дещеревский, А.А. Лукк, А.Я. Сидорин // Физика Земли. 2003. № 4. С. 3–20.
12. Пудовкин М.И. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры / М.И. Пудовкин, О.М. Распопов // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Том 32. № 5. С. 1–22.
13. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (Дата обращения 25.05.2018)