

УДК 550.837: 575.2

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Л.Г. Свердловик

Проанализированы результаты электромагнитного мониторинга методом зондирования становлением поля в дальней зоне в сопоставлении с сейсмической активностью в Центральной и Юго-восточной Азии. Показано наличие корреляции между аномалиями короткопериодных вариаций приращений удельного электрического сопротивления, характеризующими скорость деформаций в земной коре, и сильными удаленными землетрясениями. Проведен спектральный анализ временных рядов приращений электрического сопротивления.

Ключевые слова: землетрясения; земная кора; электроимпульсное зондирование; удельное электрическое сопротивление, аномалии.

ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН САЛЫШТЫРМАЛУУ ЭЛЕКТР КАРШЫЛЫГЫНЫН КЫСКА МӨӨНӨТТҮҮ ВАРИАЦИЯЛАРЫ

Л.Г. Свердловик

Алыскы зонадагы талааны зонддоо ыкмасы менен электромагниттик мониторингдин натыйжалары Борбордук жана Түштүк-Чыгыш Азиядагы сейсмикалык активдүүлүк менен салыштырылып, талдоого алынды. Жер кыртышындагы деформациялардын ылдамдыгын мүнөздөөчү салыштырмалуу электр каршылыгынын кыска мөөнөттүү вариацияларынын аномалиялары жана күчтүү жана алыскы жер титирөө ортосундагы корреляциясынын бар экени көрсөтүлдү. Электр каршылыгынын өсүшүнүн убакыт катарларына спектралдык талдоо жүргүзүлдү.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; жер кыртышы; электр импульстук зонддоо; салыштырмалуу электр каршылыгы; аномалиялар.

SHORT-PERIOD VARIATIONS OF SPECIFIC ELECTRIC RESISTANCE OF EARTH CRUST

L.G. Sverdlik

The article considers the results of electromagnetic monitoring using the sensing of formation of field in far zone are compared with seismic activity in Central and Southeast Asia. It is shown the presence of correlation between anomalies of short-period variations of specific electrical resistance increments, characterizing the strain rate in the earth's crust and strong distant earthquakes. Spectral analysis of time series in the electrical resistance increments is carried out.

Keywords: earthquake; earth's crust; electropulse sensing; specific electrical resistance; anomalies.

Введение. Существующая в Кыргызской Республике практика мониторинга, прогноза и предупреждения чрезвычайных ситуаций природного характера не в полной мере отвечает требуемому уровню оперативного и эффективного решения задач по обеспечению безопасности населения [1]. В ряду немногочисленных регулярных и долговременных эксперименталь-

ных исследований можно отметить проведение экологического и климатического мониторинга, основанного на измерениях спектральных оптических и микрофизических свойств атмосферного аэрозоля [2–5], и изучение геодинамических, сейсмических и геофизических процессов, происходящих в земной коре [6, 7]. При решении задачи прогноза сейсмической опасности широкое

применение получил электромагнитный и геомагнитный мониторинг вариаций электрических и магнитных характеристик земной коры, сопровождающих активизацию напряженно-деформационных полей, как правило, предшествующих сильным землетрясениям [8]. Важной составной частью комплексных геофизических исследований, направленных на нахождение взаимосвязи между напряженно-деформационными процессами и сейсмической активностью, является метод зондирования становлением поля в дальней зоне (ЗСД). Измерения удельного электрического сопротивления с использованием метода ЗСД, которые проводятся Научной станцией РАН на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), охватывают период с 1990 г. по настоящее время [6].

В рамках выполнения задачи экспериментального изучения динамики электромагнитных параметров земной коры на пунктах мониторинга ЗСД были проанализированы материалы наблюдений и построенные на их основе пространственно-временные распределения короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления в сопоставлении с сейсмической активностью в периоды подготовки и прохождения локальных, региональных и сильных удаленных землетрясений.

Данные электромагнитных наблюдений.

Пространственное расположение стационарных пунктов режимного электромагнитного мониторинга (НС РАН в г. Бишкеке) методом зондирования становлением поля, вытянуто в широтном направлении. Расстояние между пунктами, находящимися в противоположных концах БГП вдоль борта Чуйской впадины и северного склона Киргизского хребта с запада на восток, со-

ставляет ~120 км (рисунок 1). Максимальное удаление приемных станций от центра полигона, где расположен питающий диполь, составляет около 60 км. Наблюдение за развитием деформационных процессов обеспечивается зондированием на глубины более 20 км.

Результаты обработки данных, полученных на каждом пункте ЗСД для пяти наиболее характерных времен становления поля в диапазоне от 0.14 до 3.14 с, позволяют построить вертикальный разрез кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_s) вдоль линии P–P, соединяющей стационарные пункты электромагнитного мониторинга, который характеризуется существенной неоднородностью, выраженной в изменениях $\log(\rho_s)$ от ~1.0 до ~3.0. Пространственно-временные распределения вариаций $\rho_s(t)$ в период с октября 2016 по февраль 2017 г. были проанализированы с целью установления взаимосвязи с данными сейсмических наблюдений. Отдельный акцент сделан на результатах электромагнитного мониторинга на стационарном пункте Аксу.

Сейсмические данные. В рассматриваемом наборе сейсмических событий выделены три группы (рисунок 2): (I) – локальная и региональная сейсмичность в пределах координат 40–44° N и 72–78° E в диапазоне энергетических классов $8.0 \leq K < 12.5$ (или $1.8 \leq M < 4.5$) по данным цифровой сейсмической сети KNET [9].

(II) – землетрясения, произошедшие в Памиро-Гиндукушской зоне (36–38° N, 68–76° E), магнитудой $M \geq 4.0$, сведения о которых взяты на интерактивном сервисе IEB (IRIS S.E. Asia Region) [10]. Наиболее крупное землетрясение в пределах этой зоны ($M = 6.6$) зарегистрировано 25.11.2016.

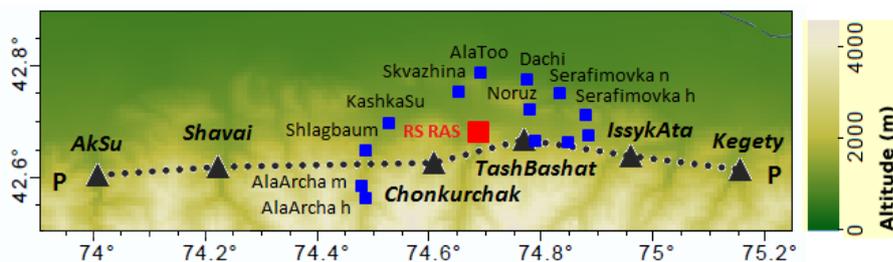


Рисунок 1 – Схема расположения пунктов электромагнитного мониторинга методом зондирования становлением поля (а). Черные треугольники – стационарные пункты, синие окружности – рядовые пункты измерений. Красным квадратом обозначено расположение системы генераторная установка – излучающий диполь (НС РАН)

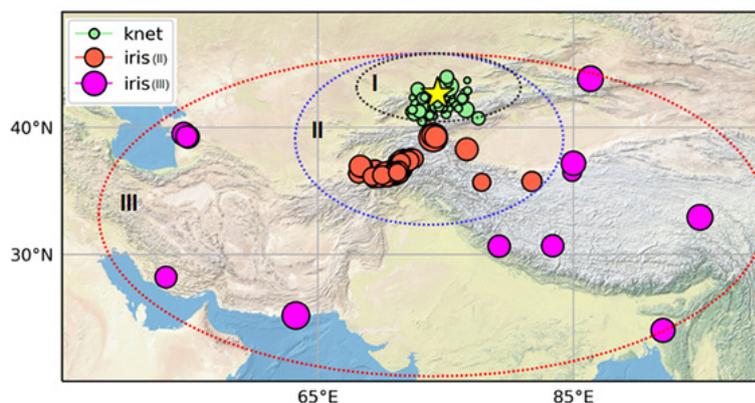


Рисунок 2 – Расположение эпицентров землетрясений по данным сети KNET (I – 65 событий) и сервиса IRIS (II – 80 событий; III – 11 событий)

(III) – удаленные землетрясения магнитудой $M \geq 5.0$, эпицентры которых располагались в пределах $10\text{--}20^\circ$ ($\sim 1000\text{--}2000$ км) от пункта мониторинга Аксу (42.60 N; 74.01 E). В эту группу вошли 11 событий: в Туркмении (26.10.2016, $M = 5.4$; 05.02.2016, $M = 5.2$), Китае (17.10.2016, $M = 5.9$; 08.12.2016, $M = 5.9$; 20.12.2016, $M = 5.6$; 01.02.2016, $M = 5.1$; 06.02.2017; $M = 5.1$), на юго-востоке Индии (03.01.2017; $M = 5.5$); юго-западе Пакистана (07.02.2017; $M = 6.3$); на севере Ирана (06.01.2017; $M = 5.0$).

Методика обработки данных электромагнитных наблюдений. На основе проведенных за день сеансов зондирования с использованием импульсного контролируемого источника ЭРГУ-600-2, вычисляли среднесуточные значения удельного электрического сопротивления (ρ). Необходимое для последующей обработки восстановление непрерывных временных рядов среднесуточных значений $\rho_\tau(t)$ выполнено кусочно-полиномиальной интерполяцией кубическими сплайнами. Пробелы в экспериментальных данных были заполнены результатами интерполяции. В качестве основных показателей изменчивости $\rho_\tau(t)$ использовали рассчитанные среднесуточные величины. Для выявления признаков аномального поведения удельного электрического сопротивления ($\rho_{\tau A}$) в периоды подготовки сильных землетрясений производили разделение данных наблюдений на длинные и короткопериодные компоненты. Короткопериодные вариации $\rho_\tau(t)$ определяли по отношению к среднемесячному уровню с использованием метода скользящего временного “окна” [11].

Поле деформаций исследуемого региона проанализировано также в терминах приращений $\Delta\rho_\tau(t)$, соответствующих различным временам становления поля на всех пунктах мониторинга, вычисленных как разность значений между каждыми последовательными элементами ряда $\rho_\tau(t)$, которые представляют собой суточные изменения удельного электросопротивления и могут характеризовать скорость деформации в результате сжатия / растяжения с равномерной дискретизацией по времени:

$$\Delta\rho_\tau(t) = \rho_\tau(t_{i+1}) - \rho_\tau(t_i).$$

Это позволило увеличить стационарность временных рядов за счет исключения низкочастотных (гладких и трендовых) компонент.

Пространственно-временное распределение вариаций $\rho_\tau(t)$. Динамика изменения аномалий короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления ($\rho_{\tau A}$), соответствующая времени становления поля $t^* = 3.14$ с для всех стационарных пунктов сети электромагнитного мониторинга, свидетельствует об относительной синхронности протекания геодинамического процесса, несколько более выраженной на двух станциях, расположенных в западной части БГП – Аксу и Шавай (рисунок 3, а). Приведены данные обработки компонент электрического поля, измеренных с помощью диполей, ориентированных в направлении север–юг.

Для исследования взаимосвязи проявления локальных и региональных сейсмических событий в изменениях кажущегося электрического сопротивления были построены проекции

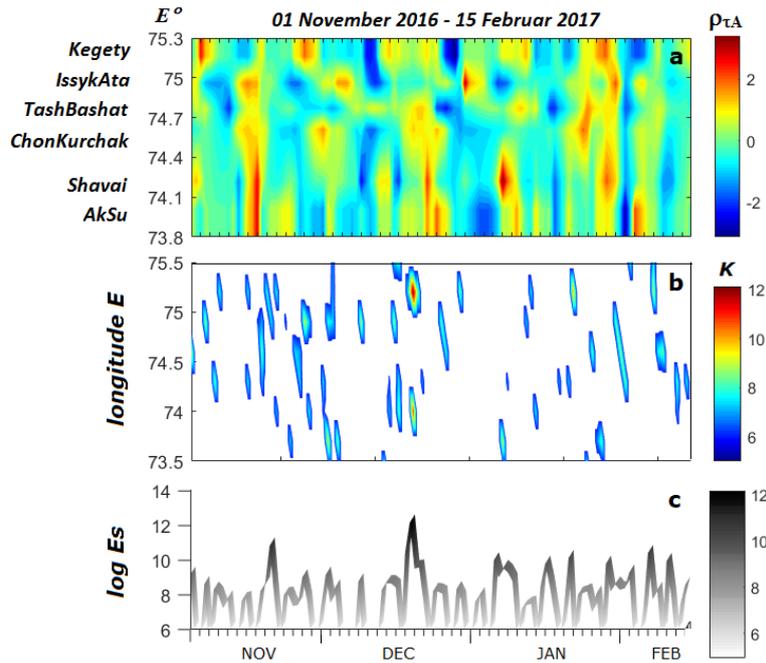


Рисунок 3 – Пространственно-временное распределение короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления на стационарных пунктах ЗСД (а), эпицентров землетрясений, спроецированных на линию, соединяющую пункты мониторинга (б) и суммарное суточное значение энергии (E_s) локальных и региональных ($KNET$) сейсмических событий (с), с 01 ноября 2016 г. по 15 февраля 2017 г.

эпицентров сейсмических событий, синхронизированных по времени с вариациями $\rho_{\tau A}$, на линию, соединяющую стационарные пункты мониторинга (рисунок 3, б). Эта линия направлена практически вдоль географической параллели (*longitude E*). В качестве характеристики сейсмической активности использовали суммарное суточное значение энергии землетрясений E_s ($E_s = \Sigma 10^{K_i}$) (Дж), где K_i – энергетический класс i -го

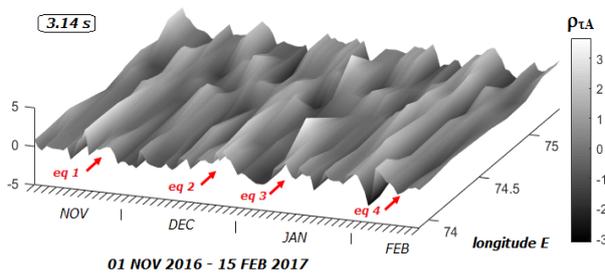


Рисунок 4 – Результаты ЗСД-мониторинга в виде распределения короткопериодных вариаций аномалий удельного электрического сопротивления ($t^* = 3.14$ с) и моменты сейсмической активности в регионе

землетрясения, зарегистрированного сейсмической сетью $KNET$ в течение суток (рисунок 3, с).

На рисунке 4 представлен фрагмент 3D распределения короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления для времени становления поля $t^* = 3.14$ с, и отмеченные маркерами периоды повышенной локальной сейсмической активности ($K > 10.0$).

Сопоставление данных электромагнитных ($\rho_{\tau A}$) и сейсмических наблюдений (E_s) показало отсутствие четкой зависимости влияния локальной сейсмичности на пространственно-временное распределение короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления или этот эффект выражен достаточно слабо (рисунки 3 и 4).

Вариации приращения удельного электрического сопротивления. На рисунке 5 представлены результаты совместного анализа трех временных рядов приращений среднесуточных величин удельного электрического сопротивления $\Delta\rho_{\tau}(t)$ для различных времен становления поля (0.14, 0.56 и 3.14 с) в пункте мониторинга

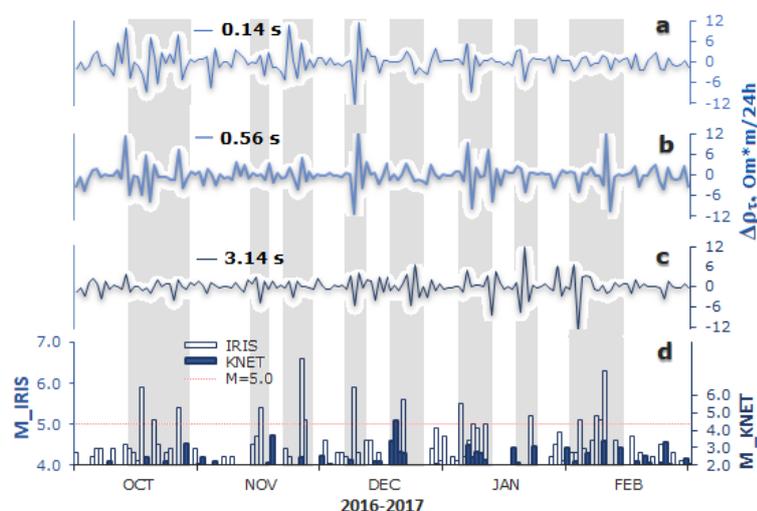


Рисунок 5 – Сопоставление соответствующих различным временам становления поля $\Delta\rho_\tau(t)$ на пункте Аксу (а – с) и распределение по времени магнитуд локальных, региональных и удаленных событий (d)

Аксу (рисунок 5 а–с), и диаграмма последовательностей магнитуд наиболее сильных для каждых суток региональных и удаленных сейсмических событий (рисунок 5, d).

Приведенные данные наглядно демонстрируют связь между деформационным процессом и сейсмической активностью. Как можно видеть, наиболее сильные события ($M > 5.0$), произошедшие в рассматриваемой области, оказывают существенное краткосрочное влияние на напряженно-деформированное состояние в земной коре, которое проявляется в разнонаправленных синхронных или предваряющих изменениях приращений удельного сопротивления на величину порядка 5.0–12.0 Ом*м. В моменты подготовки и прохождения этих удаленных землетрясений амплитуды наблюдаемых вариаций $\Delta\rho_\tau(t)$ выходили за пределы интервала $\pm 3\sigma$. Принимая во внимание вычисленные значения стандартного отклонения (σ), соответствующие различным временам становления поля, получим составляющие: $\sigma_{0.14} = 3.190$; $\sigma_{0.56} = 3.365$ и $\sigma_{3.14} = 2.668$. Менее выраженные изменения среднесуточных значений $\Delta\rho_\tau(t)$, которые, как правило, не выходили за пределы диапазона ± 3.0 Ом*м, наблюдались в периоды отсутствия значительной сейсмической активности.

Сравнение графиков $\Delta\rho_\tau(t)$ также показало, что деформационный процесс на разных глубинах, в данном случае ~5.0, 10.0 и 15.0–20.0 км, не является согласованным и взаимосвязанным,

и аномальные изменения $\rho_\tau(t)$ на одном из уровней не всегда сопровождаются изменениями на других. Это, вероятно, обусловлено тем, что каждый из исследуемых диапазонов глубин, соответствующих рассматриваемым временам становления поля, имеет определенные отличия, связанные со строением земной коры в районе расположения станции Аксу. Разуплотненные с заполнением пор и трещин флюидом области повышенной электропроводности с пониженной скоростью прохождения продольных волн (волноводы) находятся в интервале глубин 20.0–45.0 км. В соответствии с этими особенностями неоднородного строения геологической среды, наиболее информативной с точки зрения реакции на удаленные землетрясения являлась верхняя часть разреза ~5.0–15.0 км, что на вейвлет-спектрограммах (рисунок 6) проявлялось в виде интенсивных высокочастотных вариаций $\Delta\rho_\tau(t)$ с периодами до 5 дней. Таким образом, более отчетливо вариации приращений удельного сопротивления наблюдались на ранних временах становления поля. На более поздних временах, а значит, в более глубоких горизонтах изменения напряженно-деформированного состояния были менее значительными.

Более детально изменения $\rho_\tau(t)$, происходящие в период подготовки и прохождения одного из наиболее сильных сейсмических событий ($M = 5.9$), которое было зарегистрировано 8 декабря 2016 г., показаны на рисунке 7, а.

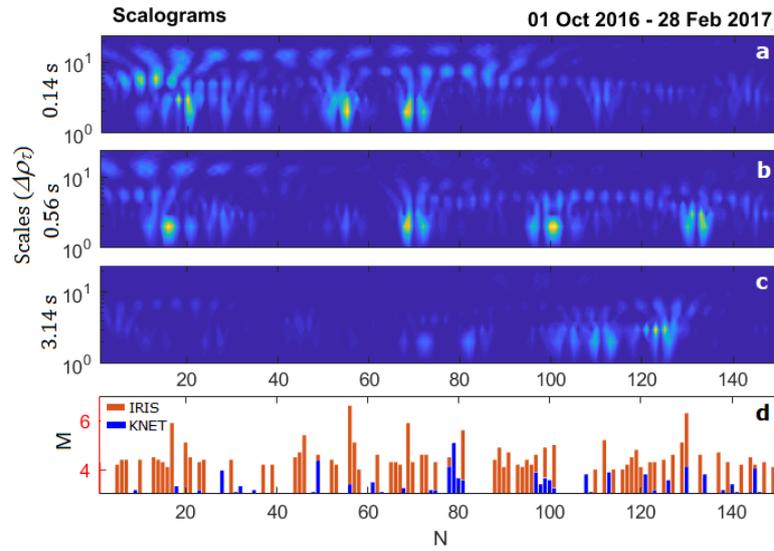


Рисунок 6 – Вейвлет-спектрограммы соответствующих различным временам становления поля $\Delta\rho_r(t)$ на пункте мониторинга Аксу (а – с) и последовательность магнитуд региональных и удаленных событий (d)

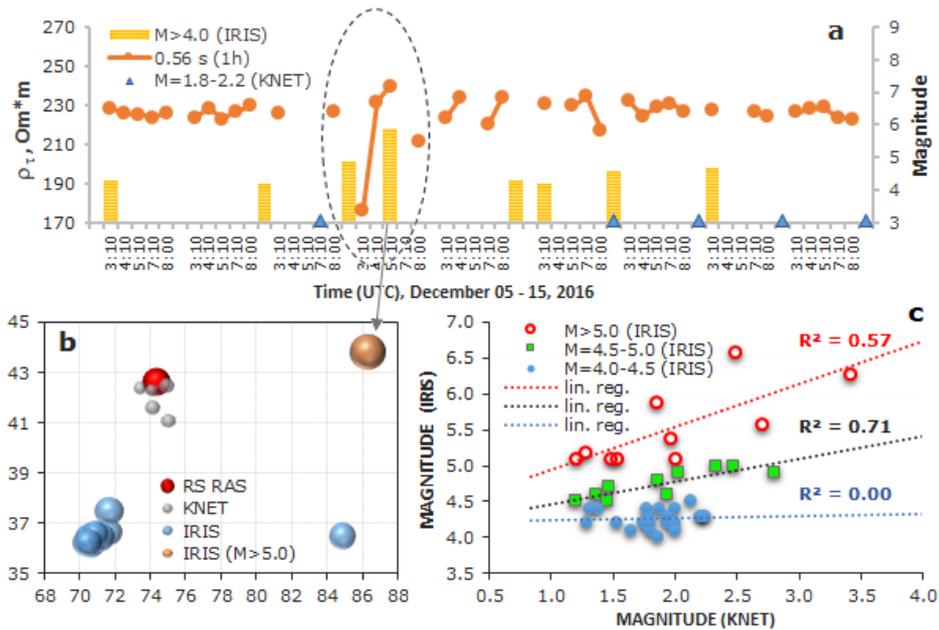


Рисунок 7 – Вариации $\rho_{0.56}$ по данным измерений 05–15 декабря 2016 г., совмещенные с последовательностью магнитуд локальных (KNET) и удаленных (IRIS) землетрясений (а), расположение их эпицентров (b) и корреляционная связь между магнитудами локальных и удаленных землетрясений (с)

Для этого использовали данные всех проведенных в течение каждых суток зондирований ($\Delta t = 1h$) в период с 05 по 15 декабря 2016 г. Пространственное расположение эпицентров всех произошедших в этот период землетрясений представлено на рисунке 7, b. Как видно,

воздействие удаленных сильных сейсмических событий ($M \geq 5.5$) является важным фактором, влияющим на наиболее выраженные короткопериодные изменения $\rho_r(t)$, а соответственно, на уровень деформаций и напряженного состояния земной коры в западной части БГП.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что аномальные короткопериодные изменения $\rho_r(t)$, вероятно, являются следствием наложения процессов подготовки отдельных локальных и удаленных событий или определенной синхронности сейсмической активации всего Среднеазиатского региона [7]. Коэффициент корреляции между магнитудами локальных и наиболее сильных ($4.5 \leq M < 5.0$ и $M \geq 5.0$) удаленных землетрясений превышает $R > 0.7$ (рисунок 7, с).

Заключение. Проанализированы результаты мониторинга временной динамики короткопериодных вариаций удельного электрического сопротивления, характеризующие деформационные процессы земной коры, с целью нахождения взаимосвязи с сейсмической активностью в Центральноазиатском регионе. Полученные результаты показали четкую реакцию на наиболее сильные удаленные землетрясения ($M \geq 5.5$) в виде увеличения абсолютных величин приращений среднесуточных значений удельного электрического сопротивления земной коры на величину порядка 5–12 Ом*м. Установлено, что воздействие сильных сейсмических событий является важным фактором, влияющим на уровень деформаций и напряженного состояния земной коры, более отчетливо проявляющееся в верхней части разреза (~5.0–15.0 км). Исследованная методом спектрального анализа структура изменчивости рядов высокочастотной компоненты приращения электросопротивления показала наличие интенсивных вариаций с периодами до 5 дней.

Литература

1. Программа комплексного мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов с учетом применения геоинформационных технологий и дистанционного зондирования на 2015–2017 гг. Утверждена постановлением Правительства КР от 23 апреля 2015 г. № 255. 5 с.
2. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) / Л.Г. Свердлик // Наука и новые технологии. 2013. № 3. С. 3–7.
3. Sverdlik L.G. Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L.G. Sverdlik, B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoiloova // В сб.: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics. 2014. С. 92923J.
4. Свердлик Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 3. С. 3–9.
5. Свердлик Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С. 26–31.
6. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) / В.Д. Брагин // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 46–53.
7. Вольхин А.М. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / А.М. Вольхин, В.Д. Брагин, и др.. М.: Наука. 1993. 158 с.
8. Рыбин А.К. Комплексные геодинамические исследования Научной станции РАН в г. Бишкеке / А.К. Рыбин, В.Д. Брагин, Г.Г. Щелочков // В сб.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. XI межд. сейсмол. школа. 2016. С. 119–133.
9. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
10. The IRIS Earthquake Browser. URL: <http://ds.iris.edu/> (20.12.2018)
11. Свердлик Л.Г. Аномальные вариации электрических характеристик земной коры и термического состояния атмосферы / Л.Г. Свердлик // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 8. С. 187–193.