

**ESTIMATES OF RELATIONSHIP BETWEEN THE DYNAMICS OF GEOPHYSICAL PARAMETERS
AND THE STRESS-STRAIN STATE OF GEOENVIRONMENT****V.D. Bragin, L.G. Sverdlik**

Research Station of RAS, Bishkek, Kyrgyzstan

ABSTRACT. The RAS Research Station started geodynamical research at the Bishkek Geodynamic Test Area (BGTA) in 1980s. This test area is located in the Northern Tien Shan, one of most seismically active zones of Central Asia. The distribution patterns of crustal deformation in space and time are investigated by a complex of geophysical, seismological and geodesic methods. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) technique is an important component of the geophysical research carried out at BGTA with the focus on forecasting of seismic activity dynamics. LOTEM is considered to be one of the most informative methods for obtaining data on multilayered conductive anisotropic geologic environment. This article presents the results of integrated interpretation of LOTEM sounding data recorded at permanent electromagnetic monitoring stations, Ak-Suu and Shavai. The time series of specific electrical resistance are analyzed to reveal a correlation with the stress-strain state of the geologic environment and seismic process in the study region in the period from January 2016 to October 2018. It is established that the deformation process taking place at a depth of more than 8.0 km is reflected in the time series of specific electrical resistance in the form of bay-shaped negative variations. A decrease of apparent resistance is observed when the receiver dipoles of the measurement unit are arranged in the meridian (N-S) direction. The periods of compression in the submeridional direction coincide with the periods with the highest density of seismic events. A comparison of earthquake hypocenter locations against the topographic relief and the data on regional faults shows the maximum density of hypocenters at the axial parts of Northern Tien Shan ridges.

KEYWORDS: Earth's crust; earthquake; Tien Shan; transient electromagnetic technique; monitoring; specific electrical resistance; deformation process; epicenter

FUNDING: The study was performed under the state assignment of the Research Station of RAS in Bishkek city (No. AAAA-A19-119020190064-9).

RESEARCH ARTICLE

Received: September 28, 2019

Revised: December 17, 2019

Accepted: February 12, 2020

FOR CITATION: Bragin V.D., Sverdlik L.G., 2020. Estimates of relationship between the dynamics of geophysical parameters and the stress-strain state of geoenvironment. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 352–364. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0479

ОЦЕНКИ ВЗАИМОСВЯЗИ ДИНАМИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ГЕОСРЕДЫ

В.Д. Брагин, Л.Г. Свердлик

Научная станция РАН, Бишкек, Кыргызстан

АННОТАЦИЯ. Геодинамические исследования пространственно-временного распределения деформаций земной коры на Бишкекском геодинамическом полигоне Научной станции РАН в г. Бишкеке, расположенном на территории Северного Тянь-Шаня, одной из наиболее сейсмоактивных областей Средней Азии, ведутся комплексом геофизических, сейсмологических и геодезических методов начиная с 80-х годов XX в. Важной составной частью выполняемых геофизических исследований, связанных с прогнозированием динамики сейсмической активности, и одним из наиболее информативных методов получения данных о многослойной проводящей анизотропной геологической среде является зондирование становлением поля в дальней зоне. Рассмотрены результаты комплексной интерпретации данных, полученных этим методом, для стационарных пунктов электромагнитного мониторинга Ак-Суу и Шавай. Временные ряды кажущегося удельного электрического сопротивления проанализированы на предмет связи с напряженно-деформационным состоянием геологической среды и сейсмическим процессом в исследуемой области в период с января 2016 г. по октябрь 2018 г. Установлено, что деформационный процесс, происходящий на глубинах более 8 км, проявляется во временных рядах удельного электрического сопротивления в виде бухтообразных отрицательных вариаций. Уменьшение кажущегося сопротивления наблюдается при расположении приемных диполей измерительной установки в меридиональном направлении (ориентированных в направлении север – юг). С периодами сжатия в субмеридиональном направлении совпадает наибольшая плотность сейсмических событий. Проведено сравнение расположения гипоцентров землетрясений с рельефом земной поверхности и данными о региональных разломах, которое показало, что максимальная плотность гипоцентров, как правило, приурочена к осевым частям хребтов Северного Тянь-Шаня.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: земная кора; землетрясение; Тянь-Шань; метод становления электромагнитного поля; мониторинг; удельное электрическое сопротивление; деформационный процесс; эпицентр

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке (№ АААА-А19-119020190064-9).

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования пространственно-временного распределения деформаций в земной коре комплексом электромагнитных и сейсмологических методов проводятся Научной станцией РАН в г. Бишкеке начиная с 80-х годов XX в. Объектом исследования является геологическая и геоэлектрическая структура Бишкекского геодинамического полигона (БГП), расположенного на территории Северного Тянь-Шаня, одной из наиболее сейсмоактивных областей Средней Азии. На рис. 1 представлена схема расположения БГП. Цель исследований заключается в проведении постоянного мониторинга развития напряженно-деформационных процессов в исследуемой области в диапазоне глубин от первых километров до ~25 км на основе анализа динамики изменения геофизических параметров с последующим установлением взаимосвязи с сейсмическим процессом на территории Тянь-Шаня [Rybin et al., 2016].

Как известно, исследования, связанные с прогнозной тематикой, нуждаются в достаточно полных знаниях о глубинном строении исследуемой территории, пространственно-временном распределении деформационных процессов в земной коре до сейсмического события, в момент события и после него, проявляющихся в вариациях различных геофизических параметров

геологической среды, в частности удельного электрического сопротивления, а также о ее анизотропных свойствах. Важной составной частью комплексных геофизических исследований и одним из наиболее информативных методов получения информации о многослойной проводящей анизотропной геологической среде, основанным на использовании скин-эффекта [Vanyan, 1966], является зондирование становлением поля в дальней зоне (ЗСД) [Strack, Vozoff, 1996; Cardador et al., 2003].

В настоящей работе для получения оценок взаимосвязи динамики геофизических параметров с напряженно-деформированным состоянием геосреды проанализированы данные электромагнитных измерений методом ЗСД на территории БГП и результаты сейсмического мониторинга на территории Тянь-Шаня в период с января 2016 г. по октябрь 2018 г.

2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕРРИТОРИИ БГП

2.1. Сеть электромагнитного мониторинга геосреды

Электромагнитные поля широко используются для регулярных наблюдений за геодинамическими процессами [Bragin, 2011; Nevedrova et al., 2016]. Для выполнения

режимных наблюдений за вариациями характеристик земной коры использовался метод ЗСД [Volikhin et al., 1993]. В качестве источника электромагнитного поля в настоящее время используется мощная электроимпульсная система ЭРГУ-600-2, нагруженная на электрический диполь длиной 4300 м. Зондирования выполняются последовательностями двуполярных прямоугольных импульсов амплитудой 600 А и периодом 10 с. Этот метод зондирования земной коры имеет достаточную чувствительность к изменению электрических свойств горных пород, слагающих разрез при изменении их напряженного состояния. Включение в комплекс работ метода, основанного на изучении магнитотеллурического поля Земли, позволяет дополнить имеющуюся информацию о развитии деформационного процесса в верхней и средней части земной коры данными о глубинном (более 20 км) строении литосферы и геоэлектрической сегментации исследуемой территории [Bataleva, Mukhamadeeva, 2018].

В период 2016–2018 гг. режимные работы методом ЗСД проводились в пунктах стационарных наблюдений: Ак-Суу, Шавай, Чон-Курчак, Таш-Башат, Иссык-Ата, Кегеты и в 14 рядовых пунктах, обслуживаемых передвижной станцией. Следует отметить, что метод ЗСД является одним из самых востребованных электромагнитных методов с использованием импульсного контролируемого источника. В комплексе с электромагнитными наблюдениями в этих же пунктах выполняются наблюдения за вариациями геомагнитного поля Земли. В табл. 1 приведены координаты пунктов,

в которых выполняются режимные электромагнитные и геомагнитные наблюдения, а на рис. 2 представлена схема расположения пунктов наблюдений [Sverdluk, 2019]. Расстояние приемных станций от полигона, где находится питающий диполь, изменяется от 9 до ~60 км.

2.2. Методика электромагнитных наблюдений и обработки данных

На стационарных пунктах наблюдения выполнялись ежедневно, кроме выходных и праздничных дней. На рядовых пунктах, обслуживаемых автомобильной приемной станцией, наблюдения проводились с дискретностью 3–5 сут. В течение суток выполнялось в среднем 6–7 сеансов зондирования продолжительностью около 15 мин с одновременной записью сигналов на всех стационарных пунктах. Прием сигналов на пунктах наблюдений осуществляется диполями, длина которых зависит от удаления от питающего диполя и варьируется в пределах от 100 до 1000 м. Компоненты электрического поля регистрируются современными цифровыми измерительными станциями типа ИС-1, которые отличаются большим динамическим диапазоном (138 дБ) и высокой чувствительностью. Синхронизация генераторной системы с сигналами в пунктах наблюдений производится встроенными в станции GPS-приемниками. Высокая частота дискретизации входного сигнала (800 Гц) и точность синхронизации (1 мкс) позволяют выполнять регистрацию процесса становления поля в большом динамическом диапазоне

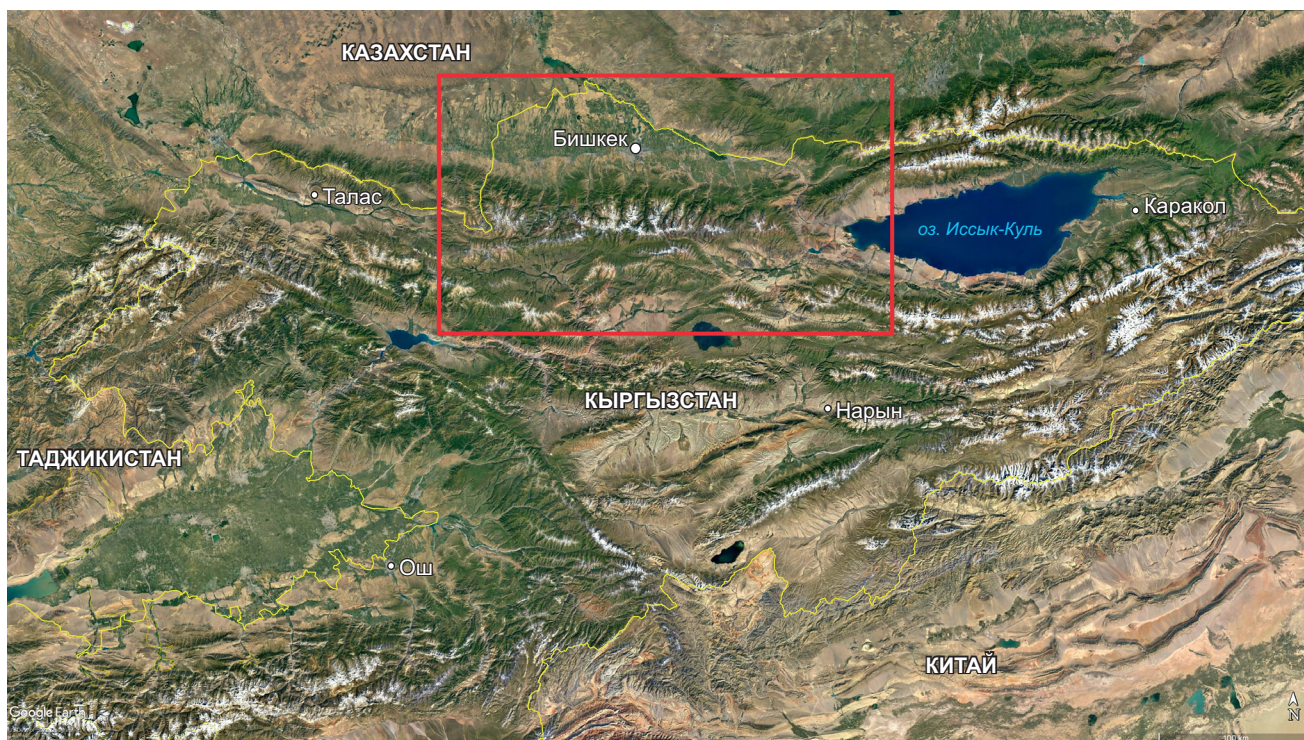


Рис. 1. Карта расположения Бишкекского геодинимического полигона на территории Северного Тянь-Шаня.

Fig. 1. Map of the Bishkek Geodynamic Test Area (BGTA), Northern Tien Shan.

Таблица 1. Координаты пунктов режимных электромагнитных наблюдений
Table 1. Coordinates of electromagnetic observation points

Наименование пункта	Широта, град.	Долгота, град.	Тип пункта
Иссык-Ата	42.641	74.958	Стационар
Шавай	42.612	74.212	Стационар
Ак-Суу	42.605	74.010	Стационар
Карагай-Булак	42.673	77.011	Стационар
Чункурчак	42.629	74.606	Стационар
Таш-Башат	42.660	74.767	Стационар
Кегеты	42.522	75.125	Стационар
Ала-Тоо	42.622	74.694	Рядовой
Серафимовка нижняя	42.757	74.837	Рядовой
Дачи	42.781	74.781	Рядовой
Скважина 1152 и 11520	42.750	74.655	Рядовой
Серафимовка верхняя	42.708	74.882	Рядовой
Тогузбулак	42.672	74.885	Рядовой
Норуз	42.721	74.784	Рядовой
Кашка-Суу	42.700	74.526	Рядовой
Шлагбаум	42.652	74.494	Рядовой
Ала-Арча	42.577	74.482	Рядовой
База	43.100	75.317	Рядовой
Алмаз	43.100	75.417	Рядовой

с $\tau \geq 1.25$ мс и достаточно хорошо разрешать позднюю стадию процесса становления поля, которая наиболее устойчива по отношению к внешним помехам, поверхностным неоднородностям и наклонам измерительного контура [Vanyan, 1966], что открывает пути для получения информации о глубинных частях разреза [Bragin, 2001, 2018; Sverdlik, 2018].

По данным каждого ЗСД на всех пунктах наблюдений с использованием алгоритма синхронного весового накопления [Bragin, 2001] формировались временные ряды кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_c) для пяти наиболее характерных времен становления поля в диапазоне от 0.14 до 3.14 с, соответствующих

разным эффективным глубинам зондирования. На основе проведенных за день сеансов зондирования вычислялись среднесуточные значения $\rho_c(t)$. Необходимое для последующей обработки восстановление непрерывных временных рядов $\rho_c(t)$ выполнялось с применением кусочно-полиномиальной интерполяции кубическими сплайнами. Пробелы в экспериментальных данных были заполнены результатами интерполяции. В качестве основных показателей изменчивости кажущегося удельного электрического сопротивления использовались рассчитанные среднесуточные величины. Для выявления наиболее характерных признаков поведения $\rho_c(t)$ в периоды сейсмической активности

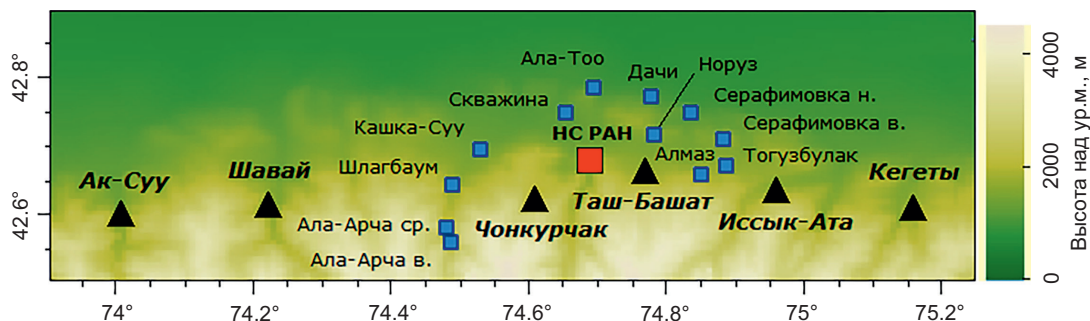


Рис. 2. Схема расположения электромагнитных приемных пунктов.

Черные треугольники – стационарные пункты, синие (малые) квадраты – рядовые пункты измерений. Красным квадратом обозначено расположение системы генераторная установка – излучающий диполь (НС РАН).

Fig. 2. Layout of electromagnetic receiving stations.

Black triangles – stationary stations; small blue squares – measuring points. Red square – location of the ‘generator set – emitting dipole’ system (RAS Research Station).

производилось разделение данных наблюдений на длинно- и короткопериодные компоненты, которые выделялись с использованием метода скользящего временного «окна» [Sverdlik, 2018].

2.3. Система сейсмологического мониторинга

Региональная сейсмическая сеть KNET эксплуатируется с сентября 1991 г. и обслуживается Международным исследовательским центром – геодинамическим полигоном в Бишкеке (IGRC), созданным на базе Научной станции РАН. В состав сети входят десять сейсмических станций, состоящих из сейсмометров Streckeisen STS-2, регистраторов REF ТЕК-72, телеметрического оборудования и центров сбора данных. Сейсмические станции объединены посредством цифровых радиотелеметрических каналов, которые обеспечивают очень высокий динамический диапазон (140 дБ) и широкополосность сейсмических данных (0.008–50.000 Гц). Конфигурация сети была продиктована обеспечением возможного максимального покрытия территории Бишкекского геодинамического полигона (41.5–43.5 °с.ш., 73–77 °в.д.). Все станции сети расположены на скальных породах, что позволяет минимизировать уровень шумов. В результате обработки записей сейсмических станций определялись координаты эпицентров землетрясений,

энергетические и динамические параметры землетрясений с последующим пополнением каталога землетрясений для исследуемой территории. Сейсмологическая сеть KNET позволяет фиксировать сейсмические события энергетического класса $K > 3.0$ внутри сети и удаленные землетрясения с $K > 15.0$. В качестве исходного материала для анализа вариаций сейсмичности на территории БГП использовался региональный каталог землетрясений, составленный ИС РАН.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Исследуя глубинное строение разреза в пунктах, в которых производятся режимные наблюдения, можно сделать выводы о горизонтах с наиболее интенсивным деформационным процессом. Исходными данными для настоящего исследования послужили результаты наземных режимных электромагнитных наблюдений на стационарном пункте Ак-Суу ИС РАН в г. Бишкеке.

3.1. Глубинное строение разреза в пункте мониторинга Ак-Суу

Геоэлектрический разрез по профилю Ак-Суу (рис. 3) отражает особенности деформационной ситуации в

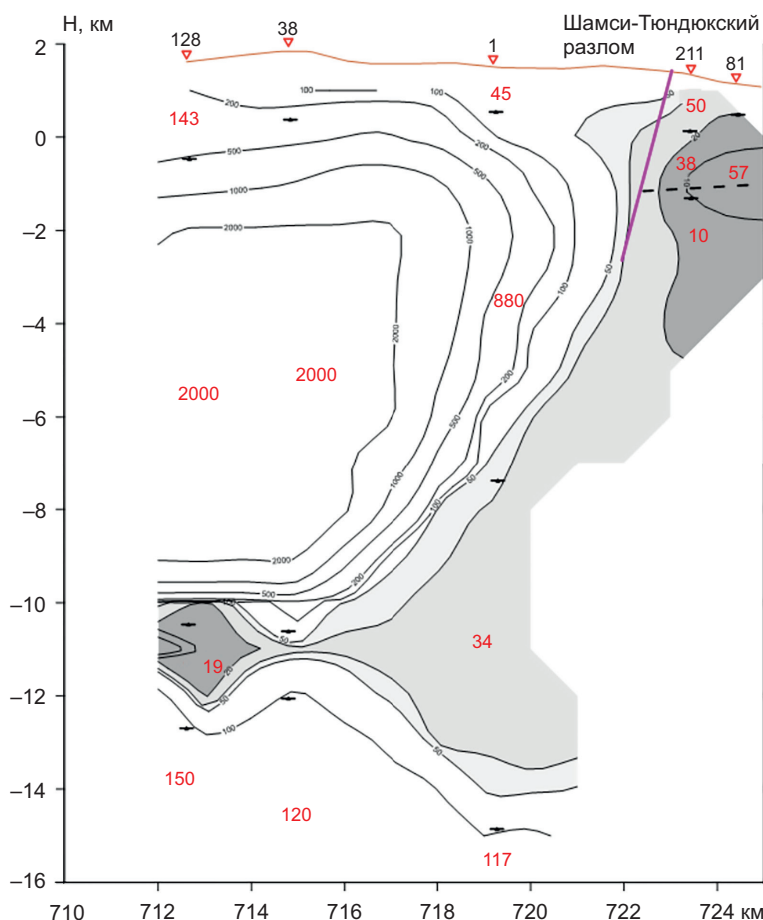


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю Ак-Суу.

Fig. 3. Geo-electric section along the Ak-Suu profile.

пункте мониторинга, расположенном в 57 км к западу от излучающего диполя (см. рис. 2). В северной части разреза расположен Шамси-Тюндюкский глубинный разлом, по которому Чуйская впадина контактирует с северными предгорьями Киргизского хребта. Мощность кайнозойских отложений к северу от разлома достигает 3 км. По данным электромагнитных зондирований здесь зафиксированы низкие сопротивления – от 4 до 50 Ом·м, которые приурочены не только к кайнозой, но и к палеозою (более 10 Ом·м). Палеозой во впадине представлен песчаниками, аргиллитами карбона, имеющими пониженные сопротивления. Аномально низкие сопротивления пород нижней части кайнозоя (4 Ом·м) экранируют влияние подстилающих пород палеозоя и не позволяют получить детальную информацию об истинном сопротивлении пород палеозоя. Кроме того, ощущается влияние Шамси-Тюндюкского разлома.

Вероятно, палеозой здесь разбит на мелкие блоки, трещиноват и частично заполнен флюидами. Все это свойственно и другим разрезам, имеющим место в зоне сочленения предгорий Киргизского хребта и Чуйской впадины. Характерно то, что низкие сопротивления, до 50 Ом·м, трассируют разлом на глубину. Он под углом 70° достигает глубины 10 км, и далее на юг фиксируется горизонтальная зона трещиноватых пород с низким сопротивлением (от 19 Ом·м на глубине 13 км), называемая «средним» слоем. В верхней части разреза к югу от Шамси-Тюндюкского разлома породы палеозоя имеют высокие сопротивления – до 2000 Ом·м. Породы, представленные здесь гранитоидами, не трещиноваты и не заполнены флюидами.

3.2. Механизм изменения электросопротивления среды

Рассмотрим динамику изменений электрического сопротивления земной коры и связь вариаций электросопротивления с сейсмическим процессом на территории БГП и его окружения, учитывая, что сейсмический процесс в общем случае характеризует геодинамическую ситуацию на этой территории.

Ранее была показана явная связь изменений электрических характеристик среды с деформационными процессами в ней, которые определяются динамикой поведения микротрещин [Bragin et al., 1992; Bogomolov et al., 2007; Bragin, Mukhamadeeva, 2009]. В общем виде можно предположить, что удельное сопротивление, как и поле напряжений, имеет тензорный характер. Фазы вариаций кажущегося удельного сопротивления, по-видимому, определяются геометрией установки зондирования (азимутом приемных диполей) по отношению к направлениям главных осей деформаций и, соответственно, к направлениям трещиноватости пород в пункте наблюдения (рис. 4).

Таким образом, исследуя анизотропию электрического сопротивления, можно делать выводы о направлении действия силы и ориентации проводящих трещин.

3.3. Вариации удельного электрического сопротивления земной коры

Временные ряды среднесуточных значений кажущегося удельного электрического сопротивления земной коры $\rho_c(t)$, полученные в результате обработки данных ЗСД на стационарном пункте Ак-Суу в период с

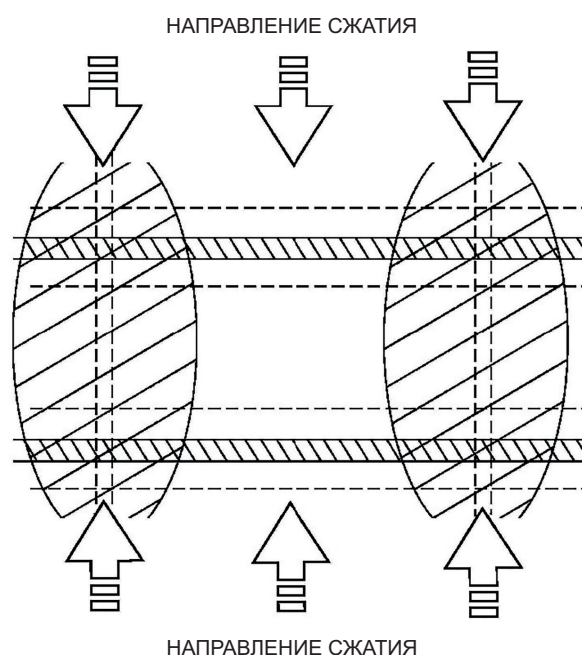


Рис. 4. Схема динамики поведения микротрещин, заполненных жидкостью и ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях (З–В и С–Ю).

Fig. 4. Behavior dynamics diagram for microcracks filled with liquid and oriented in mutually perpendicular directions (W–E and N–S).

04.01.2016 г. по 10.10.2018 г. для трех времен становления поля (0.14, 0.56 и 3.14 с), показаны на рис. 5.

На рис. 5, а, отражающем изменения $\rho_t(t)$ на ранней стадии становления поля (время задержки 0.14 с), в феврале 2017 и в январе 2018 г. отмечается скачкообразное изменение сопротивления среды. С учетом поведения микротрещин, заполненных жидкостью, из приведенной на рис. 4 модели следует, что в западной части геодинамического полигона в верхней части разреза ($H \approx 7-8$ км) с февраля 2017 г. наблюдается интенсивное сжатие в субмеридиональном направлении. В нижележащем горизонте ($H \approx 8-10$ км), которому соответствует время становления поля 0.56 с, деформационный

процесс протекает менее активно, однако во временном ряду наблюдаются бухтообразные отрицательные вариации кажущегося сопротивления (рис. 5, б). Подобная картина наблюдается и в вариациях $\rho_t(t)$ на времени задержки 3.14 с, соответствующих глубинам $H > 10$ км (рис. 5, в).

Важным фактором существенного краткосрочного изменения деформаций и напряженного состояния земной коры на территории БГП являлось воздействие наиболее сильных локальных, региональных ($M \geq 4.0$) и удаленных ($M \geq 5.5$) землетрясений. Это воздействие проявлялось в хорошо выраженных разнонаправленных синхронных или предваряющих сейсмические

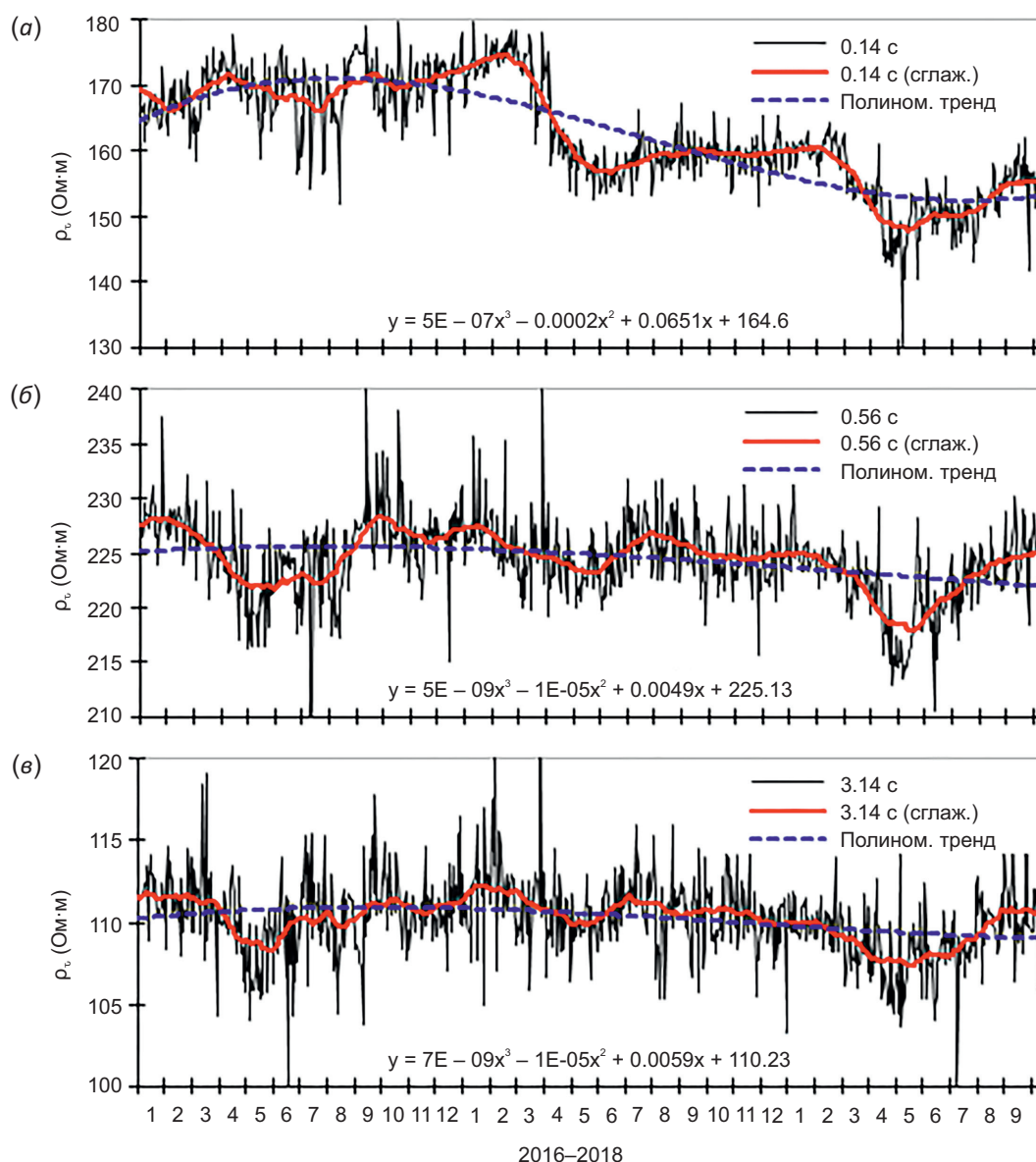


Рис. 5. Графики изменения среднесуточных значений кажущегося удельного электрического сопротивления и сглаженные скользящим временным «окном» 60 сут и полиномом 3-й степени вариации $\rho_t(t)$ на временах задержки 0.14 с (а), 0.56 с (б) и 3.14 с (в) в пункте Ак-Суу в период с 04 января 2016 г. по 10 октября 2018 г.

Fig. 5. Graph of daily variations of specific electrical resistance $\rho_t(t)$ values, and variations smoothed by a sliding time window of 60 days and a cubic polynomial at delay times of 0.14 s (a), 0.56 s (б) and 3.14 s (в) at the Ak-Suu station for the period from January 4, 2016 to October 10, 2018.

события аномальных изменениях приращений удельного сопротивления на величину порядка 5–12 Ом·м, периодичность которых не превышала 5 сут. Более отчетливо аномалии короткопериодных вариаций $\rho_c(t)$, выходящие за пределы интервала $\pm 2\sigma$, проявлялись в верхней части разреза ($H \sim 7$ –8 км) [Sverdlik, 2019].

На рис. 6 приведены графики сравнения сглаженных временным окном 60 сут вариаций кажущегося удельного сопротивления на двух пунктах мониторинга – Ак-Суу (AK) и Шавай (SH), расположенных в западной части БГП. Как видно, в этих пунктах наблюдается идентичное изменение электросопротивления по всей глубине геоэлектрического разреза, и, соответственно, можно полагать, что и деформационный процесс также протекает идентично.

3.4. Сопоставление данных электромагнитных и сейсмических измерений

Ранее было установлено, что землетрясения, происходящие на территории Бишкекского геодинамического полигона, как правило, находят отражение во временных рядах удельного электрического сопротивления [Bragin, 2001]. Анализ каталога землетрясений

показал, что исследуемый период характеризовался относительно стабильным сейсмическим режимом. В нижней части рис. 7 представлена диаграмма временного распределения землетрясений энергетического класса $K > 9.0$, зарегистрированных сетью KNET на территории полигона. Сравнение количества землетрясений, произошедших в рассматриваемые годы, показало, что 2018 г. отличался меньшей сейсмической активностью (226 сейсмических событий) по отношению к 2017 г. (363 события).

Из сопоставления вариаций кажущегося удельного сопротивления с сейсмической активностью Бишкекского геодинамического полигона (рис. 7) видно, что наиболее высокая плотность во временном распределении сейсмических событий совпадает с периодами сжатия в субмеридиональном направлении. При этом, как и ранее, наблюдается уменьшение кажущегося сопротивления при расположении приемных диполей измерительной установки в меридиональном направлении (ориентированных в направлении север – юг). Примерно подобная картина наблюдается во всех пунктах, в которых были произведены режимные электромагнитные зондирования.

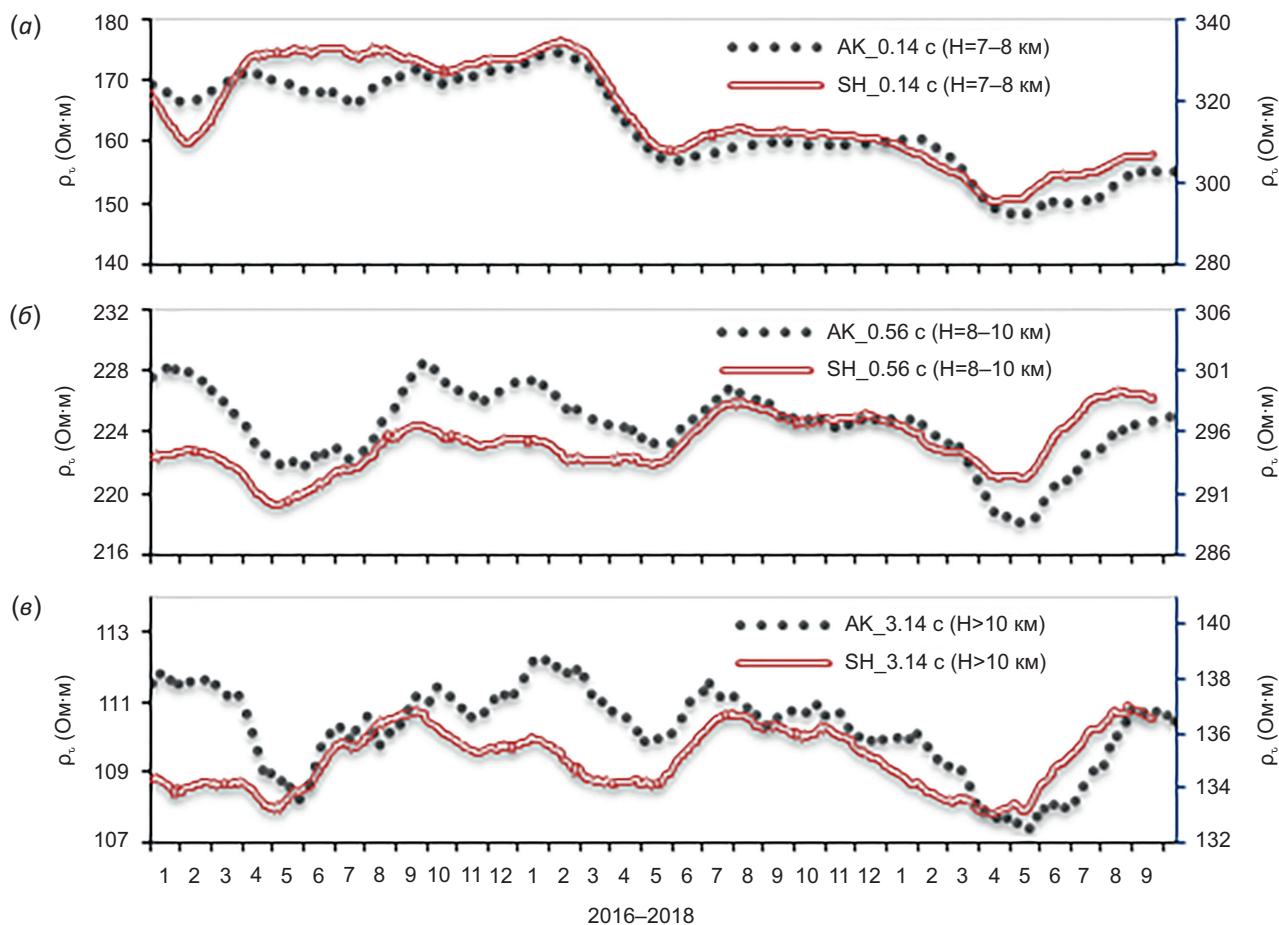


Рис. 6. Графики сравнения вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления на временах задержки 0.14 с (а), 0.56 с (б) и 3.14 с (в) по разрезу в пунктах Ак-Суу (AK) и Шавай (SH).

Fig. 6. Diagram of comparison of specific electrical resistance variations at delay times of 0.14 s (a), 0.56 s (b) and 3.14 s (c) along the cross-sections at Ak-Suu (AK) and Shavai (SH) stations.

3.5. Распределение землетрясений на территории Тянь-Шаня

На территории Тянь-Шаня отмечаются локальные, ограниченные по площади зоны сжатия и растяжения, которые в общем случае не согласуются со структурой разломов. Отдельные участки разломов по их простиранию могут находиться и в зонах сжатия, и в зонах

растяжения, а также в спокойных зонах, где градиенты близки к нулевым значениям. Ярким исключением является зона Челико-Кеминского разлома, где отмечается значительный по величине положительный градиент скорости (зона сжатия) по всему простиранию разлома. На рис. 8 представлена разломная структура Тянь-Шаня и распределение эпицентров сейсмических

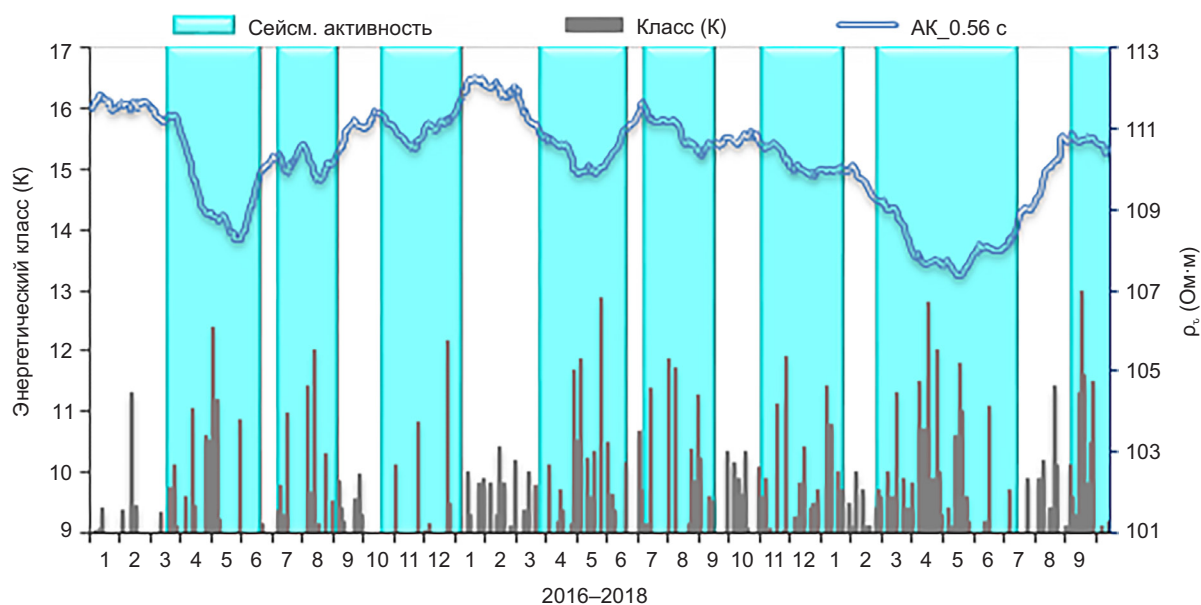


Рис. 7. Сопоставление вариаций кажущегося удельного сопротивления в пункте Ак-Суу и сейсмической активности на территории полигона в период с января 2016 г. по октябрь 2018 г. (распределения сейсмических событий $K > 9.0$).

Fig. 7. Comparison of apparent resistivity variations at the Ak-Suu (AK) station and seismic activity variations in the test site during the period from January 2016 to October 2018 (distributions of $K > 9.0$ seismic events).

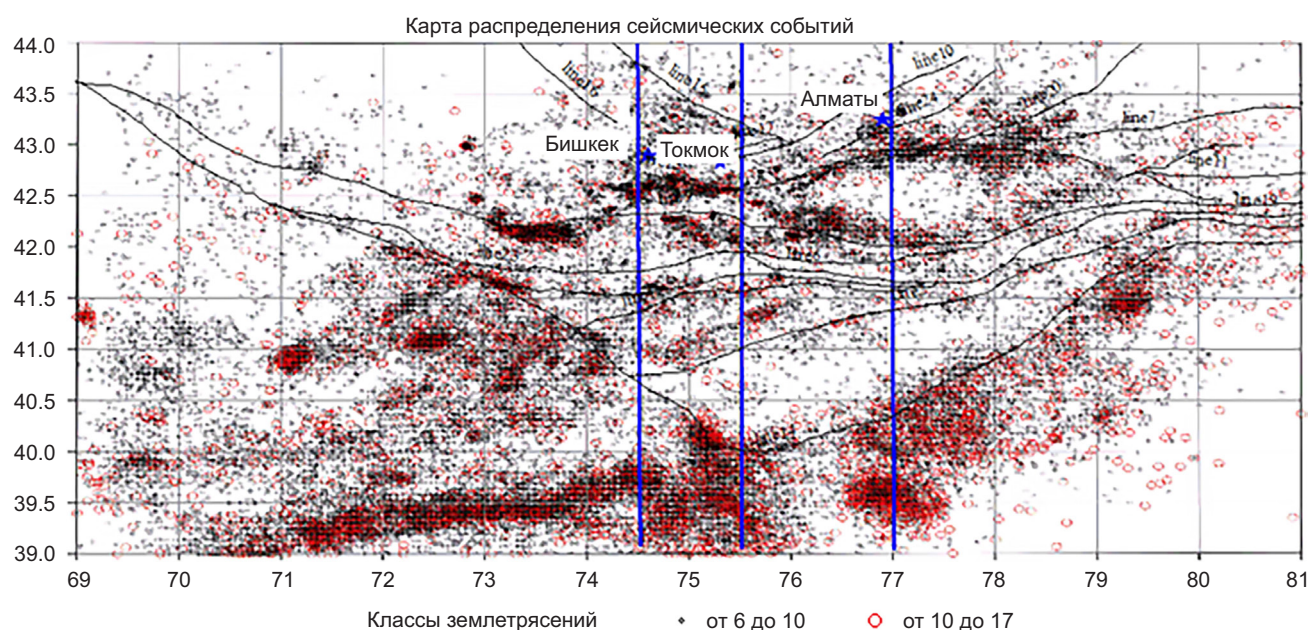


Рис. 8. Распределение эпицентров землетрясений по территории Тянь-Шаня. Проекция разломов на поверхность земной коры показана черными линиями. Синие линии – профили глубинных разрезов.

Fig. 8. Distribution of earthquake epicenters in the Northern Tien Shan. Black lines – faults on the crust surface. Blue lines – depth sections.

событий по этой территории, построенное для двух диапазонов энергетических классов: $6.0 < K < 10.0$ и $10.0 \leq K < 17.0$.

Видно, что плотность эпицентров в пределах исследуемого района существенно неравномерна. Относительно сильные землетрясения ($K \geq 10.0$) концентрируются преимущественно в областях ее северной и южной границ [Bragin, 2001; Laverov, Makarov, 2005].

Положение разломов выделено геологами на поверхности визуально. Как следует из рис. 8, положение эпицентров землетрясений не всегда согласуется в плане с разломами. К такому же выводу можно прийти, анализируя распределение землетрясений по глубине. На рис. 8 вертикальными синими линиями показано положение глубинных разрезов, секущих Тянь-Шань по меридианам 77° в.д. (траверс г. Алматы), 75.5° в.д.

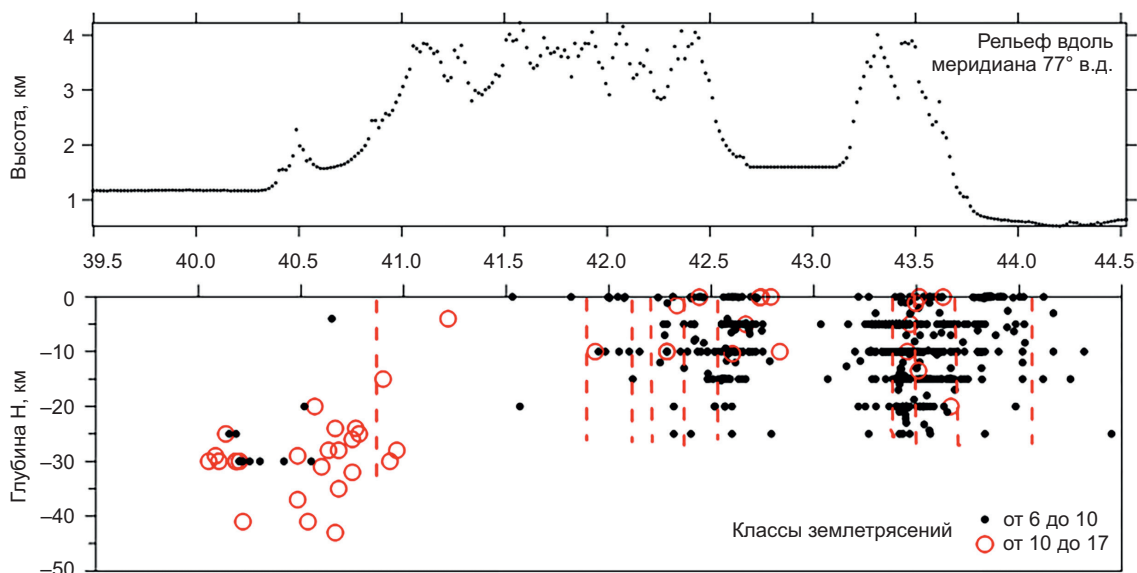


Рис. 9. Рельеф земной поверхности, глубинный разрез земной коры и распределение землетрясений по глубине вдоль профиля 77° в.д. (траверс г. Алматы). Штриховыми линиями обозначены места выходов разломов на дневную поверхность земной коры.

Fig. 9. The Earth's surface relief, the depth section of the crust, and the depth distribution pattern of earthquakes along 77° E profile (Almaty traverse). Dashed lines – faults observed at the crust surface.

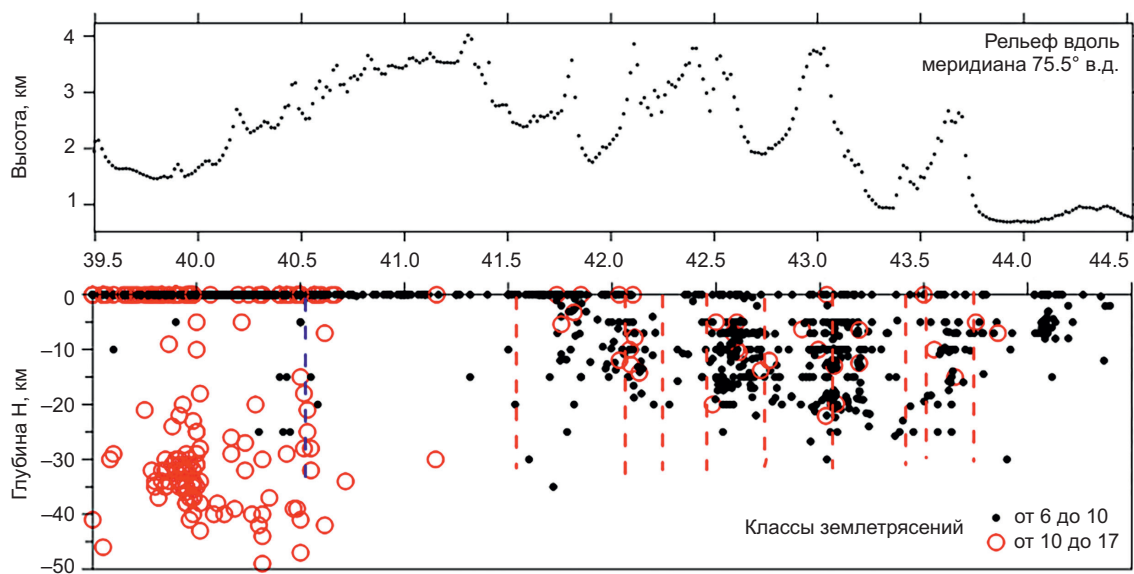


Рис. 10. Рельеф земной поверхности, глубинный разрез земной коры и распределение землетрясений по глубине вдоль профиля 75.5° в.д. (траверс г. Токмок). Штриховыми линиями обозначены места выходов разломов на дневную поверхность земной коры.

Fig. 10. The Earth's surface relief, the depth section of the crust, and the depth distribution pattern of earthquakes along 75.5° E profile (Tokmok traverse). Dashed lines – faults observed at the crust surface.

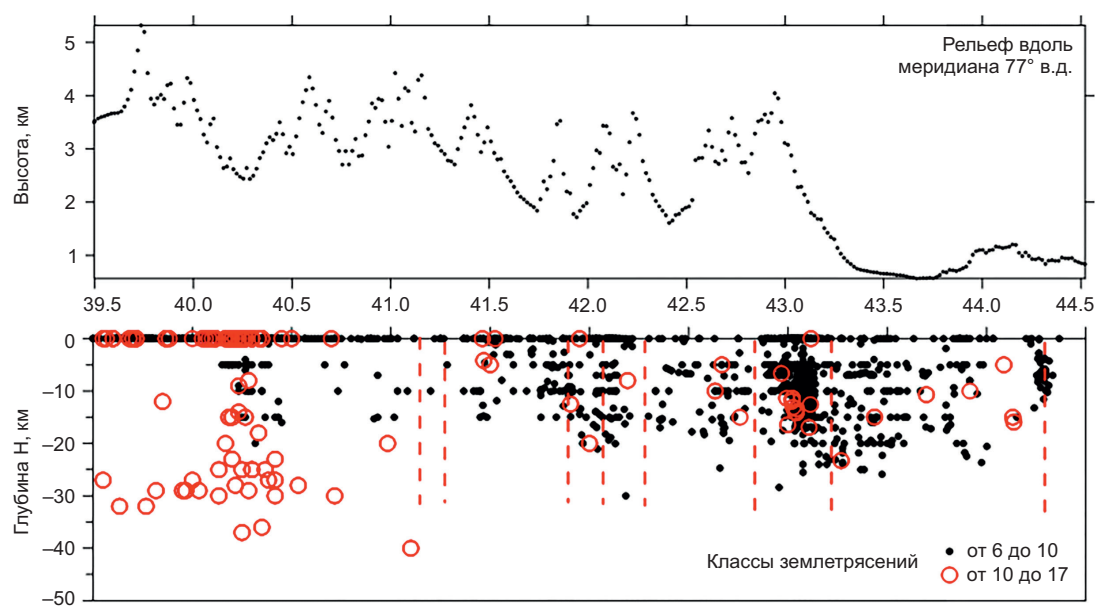


Рис. 11. Рельеф земной поверхности, глубинный разрез земной коры и распределение землетрясений по глубине вдоль профиля 74.5° в.д. (траверс г. Бишкек). Штриховыми линиями обозначены места выходов разломов на дневную поверхность земной коры.

Fig. 11. Earth's surface relief, the depth section of the earth's crust and the distribution of earthquakes in depth along 74.5° E profile (traverse of Bishkek). Dashed lines indicate the places where faults have reached the surface of the earth's crust.

(траверс г. Токмок), 74.5° в.д. (траверс г. Бишкек) (рис. 9, 10, 11), которые соответствуют областям сгущения в распределении эпицентров.

Из анализа материалов, показанных на рис. 9, 10, 11, видно, что максимальная плотность гипоцентров землетрясений приурочена к вертикальным зонам и в большинстве случаев совпадает с осевыми частями хребтов Северного Тянь-Шаня. Учитывая приведенные обстоятельства, можно прийти к выводу, что видимая корреляция вариаций кажущихся сопротивлений в пунктах режимных наблюдений и моментов возникновения землетрясений определяется деформационным процессом в земной коре Северного Тянь-Шаня.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленных результатов мониторинга временной динамики вариаций удельного электрического сопротивления, характеризующих деформационные процессы земной коры, и оценки их взаимосвязи с сейсмическим процессом на территории Бишкекского геодинамического полигона и его окружения позволяют сделать следующие выводы.

1. Корреляция вариаций кажущихся сопротивлений в пунктах режимных наблюдений и моментов возникновения землетрясений определяется деформационным процессом в земной коре Северного Тянь-Шаня.

2. Периоды наибольшей сейсмической активности на территории БГП нашли отражение во временных рядах кажущегося удельного сопротивления в виде бухтообразных вариаций длительностью от 10 до 80 сут. Уменьшение кажущегося удельного сопротивления наблюдается при расположении приемных диполей

измерительной установки в меридиональном направлении (север – юг).

3. На основе исследования эффектов электрической анизотропии предложен механизм связи изменений электрического сопротивления среды с деформационным процессом на изучаемой территории, который позволяет делать выводы о направлении действия силы и преобладающей ориентации проводящих трещин.

4. Изучение геоэлектрических разрезов северных склонов Киргизского хребта позволило выявить новые особенности структуры фундамента и высказать дополнительные соображения о природе глубинных (более 15 км) низкоомных горизонтов.

5. Сейсмический режим для территории БГП в 2018 г. по сравнению с 2017 г. отличался меньшей сейсмической активностью. Наибольшая плотность во временном распределении сейсмических событий совпадает с периодами сжатия земной коры в субмеридиональном направлении.

6. Пространственная картина сейсмичности на полигоне неразрывно связана с особенностями его геоэлектрического строения. При этом основную роль в этом плане играет положение электропроводящих областей и их взаимоотношения с высокоомными блоками. Сейсмогенерирующими являются области повышенной электропроводности.

7. На основании комплексного анализа распределения геоэлектрических и скоростных неоднородностей литосферы Центрального Тянь-Шаня вдоль профилей 77° в.д. (траверс г. Алматы), 75.5° в.д. (траверс г. Токмок), 74.5° в.д. (траверс г. Бишкек) установлено, что зонам с низкими удельными сопротивлениями соответствуют

области пониженных сейсмических скоростей и зонам с пониженной электропроводностью – области повышенных сейсмических скоростей.

8. Не обнаруживается какой-либо связи расположения сейсмогенерирующей зоны в центральной части Бишкекского геодинамического полигона и составляющих ее частей с геологическими структурами. Максимальная плотность гипоцентров в большинстве случаев приурочена к осевым частям хребтов Северного Тянь-Шаня.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A., 2018. Complex Electromagnetic Monitoring of Geodynamic Processes in the Northern Tien-Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (2), 461–487 (in Russian) [Баталева Е.А., Мухаммадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>.

Vogomolov L., Bragin V., Fridman A., Makarov V., Sobolev G., Polyachenko E., Schelochkov G., Zeigarnik V., Zubovich A., 2007. Comparative Analysis of GPS, Seismic and Electromagnetic Data on the Central Tien Shan Territory. *Tectonophysics* 431 (1–4), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.043>.

Bragin V.D., 2001. Active Electromagnetic Monitoring of the Bishkek Prognostic Test Area. PhD Thesis (Candidate of Physics and Mathematics). Moscow, 135 p. (in Russian) [Брагин В.Д. Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогностического полигона: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2001. 135 с.].

Bragin V.D., 2011. Seismic Studies of the Effects Caused by Powerful Industrial Explosion around the Naryn Cascade of Hydroelectric Power Stations (Kambarata). *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 11 (4), 46–53 (in Russian) [Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2011. Т. 11. № 4. С. 46–53].

Bragin V.D., 2018. Spectra and Correlation Functions of Signals of Electroimpulse Sounding of the Earth Crust. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 18 (8), 44–48 (in Russian) [Брагин В.Д. Спектры и корреляционные функции сигналов электроимпульсного зондирования земной коры // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2018. Т. 18. № 8. С. 44–48].

Bragin V.D., Mukhamadeeva V.A., 2009. Study of Variations in the Anisotropy of Electrical Resistance in the Crust at the Bishkek Geodynamic Test Area. In: *Geodynamics of*

Intracontinental Orogens and Geocological Problems. Materials of the Fourth International Symposium (June 15–20, 2008). Issue 4. Moscow – Bishkek, 74–84 (in Russian) [Брагин В.Д., Мухаммадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические проблемы: Сборник материалов четвертого международного симпозиума 15–20 июня 2008 г. Москва – Бишкек, 2009. № 4. С. 74–84].

Bragin V.D., Volykhin A.M., Trapeznikov Yu.A., 1992. Electrical Resistivity Variations and Moderate Earthquakes. *Tectonophysics* 202 (2–4), 233–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90107-H](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90107-H).

Cardador M.H., Cuevas A.L., Watanabe H., Saito A., Wada K., Ishikawa H., Okuzumi K., 2003. Experimental Evaluation of Hydrocarbon Detection with the Long-Offset Time-Domain Electromagnetic Method in the Cretaceous Carbonates of the Tampico–Misantla Basin, Mexico. *Journal of Applied Geophysics* 52 (2), 103–122. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00243-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00243-4).

Laverov N.P., Makarov V.I. (Eds), 2005. Recent Geodynamics of Intracontinental Areas of Collision Mountain Building (Central Asia). Nauchny Mir, Moscow, 400 p. (in Russian) [Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. Н.П. Лаверов, В.И. Макаров. М.: Научный мир, 2005. 400 с.].

Nevedrova N.N., Rokhina M.G., Shalaginov A.E., Sanchaa A.M., 2016. Analysis of Longterm Observations by Method of Non-Stationary Electromagnetic Sounding (On the Example of the Seismoactive Zone Gorny Altai). *Mining Informational and Analytical Bulletin* (12), 190–212 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Рохина М.Г., Шалагинов А.Е., Санчаа А.М. Анализ многолетних наблюдений методом нестационарного электромагнитного зондирования (на примере сейсмоактивной зоны Горного Алтая) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 190–212].

Rybin A.K., Bragin V.D., Tchelochkov G.G., 2016. Integrated Geodynamic Research of Research Station of RAS in Bishkek City. In: *Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data. Proceedings of XI International Seismological Workshop (September 12–16, 2016, Cholpon-Ata)*. Obninsk, p. 119–133 (in Russian) [Рыбин А.К., Брагин В.Д., Щелочков Г.Г. Комплексные геодинамические исследования Научной станции РАН в г. Бишкеке // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XI Международной сейсмологической школы (12–16 сентября 2016 г., Чолпон-Ата). Обнинск, 2016.

Strack K.M., Vozoff K., 1996. Integrating Long-Offset Transient Electromagnetics (LOTEM) with Seismics in an Exploration Environment. *Geophysical Prospecting* (44), 997–1017. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00188.x>.

Sverdlik L.G., 2018. Anomalous Variations of Earth Crust Electrical Characteristics and Thermic State of Atmosphere.

Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University 18 (8), 187–193 (in Russian) [Свердлик Л.Г. Аномальные вариации электрических характеристик земной коры и термического состояния атмосферы // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2018. Т. 18. № 8. С. 187–193].

Sverdlik L.G., 2019. Short-Period Variations of Specific Electric Resistance of Earth Crust. Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University 19 (4), 143–149 (in Russian) [Свердлик Л.Г. Короткопериодные вариации удельного электрического сопротивления земной коры // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2019. Т. 19. № 4. С. 143–149].

Vanyan L.L., 1966. Transient of an Electromagnetic Field and Its Use for Solving Structural Geology Problems. Nauka, Novosibirsk, 106 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии. Новосибирск: Наука, 1966. 106 с.].

Volikhin A.M., Bragin V.D., Zubovich A.V., Koshkin N.A., Trapeznikov Yu.A., 1993. The Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields. Nauka, Moscow, 158 p. (in Russian) [Волыхин А.М., Брагин В.Д., Zubovich А.В., Кошкин Н.А., Трапезников Ю.А. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.].

VITALY D. BRAGIN

Candidate of Physics and Mathematics, Head of laboratory
Research Station of RAS
Bishkek 720049, Kyrgyzstan
e-mail: vitaly_bragin@rambler.ru

ВИТАЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ БРАГИН

канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Научная станция РАН
720049, г. Бишкек, Кыргызстан

LEONID G. SVERDLIK

Candidate of Physics and Mathematics, Researcher
Research Station of RAS
Bishkek 720049, Kyrgyzstan
e-mail: l.sverdlik@mail.ru

ЛЕОНИД ГРИГОРЬЕВИЧ СВЕРДЛИК

канд. физ.-мат. наук, н.с.
Научная станция РАН
720049, г. Бишкек, Кыргызстан