GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2018 VOLUME 9 ISSUE 2 PAGES 461–487 ISSN 2078-502X

https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356

COMPLEX ELECTROMAGNETIC MONITORING OF GEODYNAMIC PROCESSES IN THE NORTHERN TIEN SHAN (BISHKEK GEODYNAMIC TEST AREA)

E. A. Bataleva, V. A. Mukhamadeeva

Research Station of RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract: At the Bishkek geodynamic test area in the Northern Tien Shan, complex electromagnetic monitoring was conducted, including a wide frequency range by magnetotelluric sounding in various modifications and induction sounding with a controlled impulse source (method of sounding in the far zone, SFZ). The geoelectrical sections of the lithosphere were constructed for the study area. Based on the geophysical monitoring data and the profile MT monitoring data on the Baitik depression, the main faults belonging to the Northern Tien Shan fault system were detected: Shamsi-Tyundyuk (Predkirgizsky), Baitik, Chonkurchak, and Issyk-Ata. From the geoelectrical data, we obtained new information that is independent of other geophysical methods used for studying the deep structure of the Earth – the hidden fault structures and the geoelectrical segmentation of the study area were revealed. The latter reflects the main elements of the block structure of the junction zone of the Chuya basin and the Kirghiz ridge. This information needs to be taken into account when constructing a comprehensive model showing the geological, geophysical and geodynamical features of the development of the Tien Shan, a vivid example of an intracontinental orogen. The MTS, FS and SFZ data from the Ak-Suu and Chon-Kurchak electromagnetic monitoring stations were interpreted. Based on the representative array of experimental electromagnetic data, we analyzed the effective depths of field penetration, which are most sensitive to changes in the electromagnetic parameters of the medium for the stationary and routine observation sites with respect to the clusters of seismic events. This paper discusses the development of the azimuth MT monitoring technique and the analysis of the time series of electromagnetic parameters, which were used for determining the contribution of each component of the impedance tensor to the informativeness of the monitoring studies. The data from the 2004–2016 KNET Catalogue of the Research Station of RAS were analyzed in order to investigate the relationship between the space-time seismicity distribution and the electrical conductivity variations that correspond to the features of the seismicity pattern at depth. Examples discussed are the time-frequency series of MT monitoring in 2007 and 2016 at the Ak-Suu and Chon-Kurchak stations that identified anomalous electromagnetic parameters corresponding to the fluid redistribution model for the pore-cracked medium: syn-phase decreasing and increasing values of the parameter by the orthogonal azimuths. Thus, a phenomenological model has been tested. It relates the change in the stress-strain state of the medium with the redistribution of fluids between the systems of fractures, which causes variations in the active and reactive components of the electrical resistance.

Key words: electromagnetic monitoring; Tien Shan; deep structure; electrical conductivity; geoelectrical section; tectonic faults and fractures

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: E.V. Sklyarov

Received: February 19, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: May 23, 2018

For citation: *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. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0356.

Для цитирования: *Баталева Е.А., Мухамадеева В.А.* Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 2. С. 461–487. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0356.

Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон)

Е. А. Баталева, В. А. Мухамадеева

Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: На основе комплексных электромагнитных исследований, выполненных в широком частотном диапазоне различными модификациями метода магнитотеллурического (МТ) зондирования с привлечением индукционного зондирования с импульсным контролируемым источником поля (метод зондирования становлением поля в дальней зоне (ЗСД)), для территории Бишкекского геодинамического полигона построены геоэлектрические разрезы литосферы Северного Тянь-Шаня. Выявлены основные разрывные нарушения – Шамси-Тюндюкский (Предкиргизский), Байтикский, Чонкурчакский и Иссык-Атинский разломы, входящие в состав Северо-Тянь-Шаньской системы разломов, которые проявляются как на геоэлектрических разрезах, построенных вдоль профилей, выполненных в зоне расположения стационаров геофизического мониторинга, так и в Байтикской впадине, где осуществляется профильный МТ-мониторинг. По данным геоэлектрики получена новая, независимая от других геофизических методов изучения глубинного строения Земли информация – существование скрытых разломных структур и геоэлектрической сегментации исследуемой территории, отражающей основные элементы блочной структуры зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта, которую необходимо учитывать при построении комплексной геолого-геофизической геодинамической модели развития Тянь-Шаня как яркого примера внутриконтинентального орогена. Рассмотрены результаты комплексной интерпретации данных МТЗ, ЧЗ и ЗСД для стационарных пунктов электромагнитного мониторинга Чон-Курчак и Ак-Суу. На представительном массиве экспериментальных электромагнитных данных проанализированы интервалы периодов (эффективных глубин проникновения поля), наиболее чувствительных к изменению электромагнитных параметров среды для стационарных и режимных пунктов наблюдений по отношению к кластерам сейсмических событий. В работе отражены исследования, связанные с развитием методики азимутального МТ-мониторинга, которые заключаются в анализе полученных временных рядов электромагнитных параметров на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований. С целью изучения взаимосвязи пространственно-временного распределения сейсмичности и вариаций электропроводности, отвечающих особенностям глубинного распределения сейсмичности, был проведен статистический анализ данных каталога KNET Научной станции РАН за 2004–2016 гг. В качестве примера приведены частотно-временные ряды МТ-мониторинга за 2007 и 2016 гг. для стационаров Ак-Суу и Чон-Курчак, где выделены аномалии электромагнитных параметров, соответствующих модели перераспределения флюида в порово-трещинном пространстве, т.е. синфазное уменьшение и увеличение значений параметра на ортогональные азимуты. Таким образом, апробирована феноменологическая модель, связывающая изменение напряженно-деформированного состояния среды с перераспределением флюидов между системами трещин, которое и вызывает вариации активной и реактивной компоненты электрического сопротивления.

Ключевые слова: электромагнитные исследования; электромагнитный мониторинг; Тянь-Шань; глубинное строение; электропроводность; геоэлектрический разрез; тектонические нарушения

1. Введение

Основная задача прогностических полигонов, расположенных на территории сейсмоопасных регионов, – выявление взаимосвязи изменений физических параметров среды, в том числе на основе анализа временных рядов геофизических наблюдений и сейсмических событий, что дает возможность прогнозирования последних. Исследования, проводимые на прогностических полигонах, таких как Гармский [*Barsukov, Sorokin, 1973; Avagimov et al., 1988*], Бишкекский (рис. 1) [*Bragin et al., 1990, 1992; Bragin, 2001; Rybin et al., 2008, 2011; Bataleva et al., 2013, 2014; Safronov et al., 2004*], Южно-Байкальский [*Nevedrova, Epov, 2012; Moroz et al., 2006, 2007*] и другие [*Lu et al., 1999; Park et al., 1993; Ernst et al., 1993; Stanica D., Stanica M., 2007*], позволили установить устойчивую взаимосвязь между изменениями электромагнитных параметров и сейсмическими событиями. Согласно современным представлениям о напряженно-деформированном состоянии земной коры и сейсмотектоническом процессе, вариации

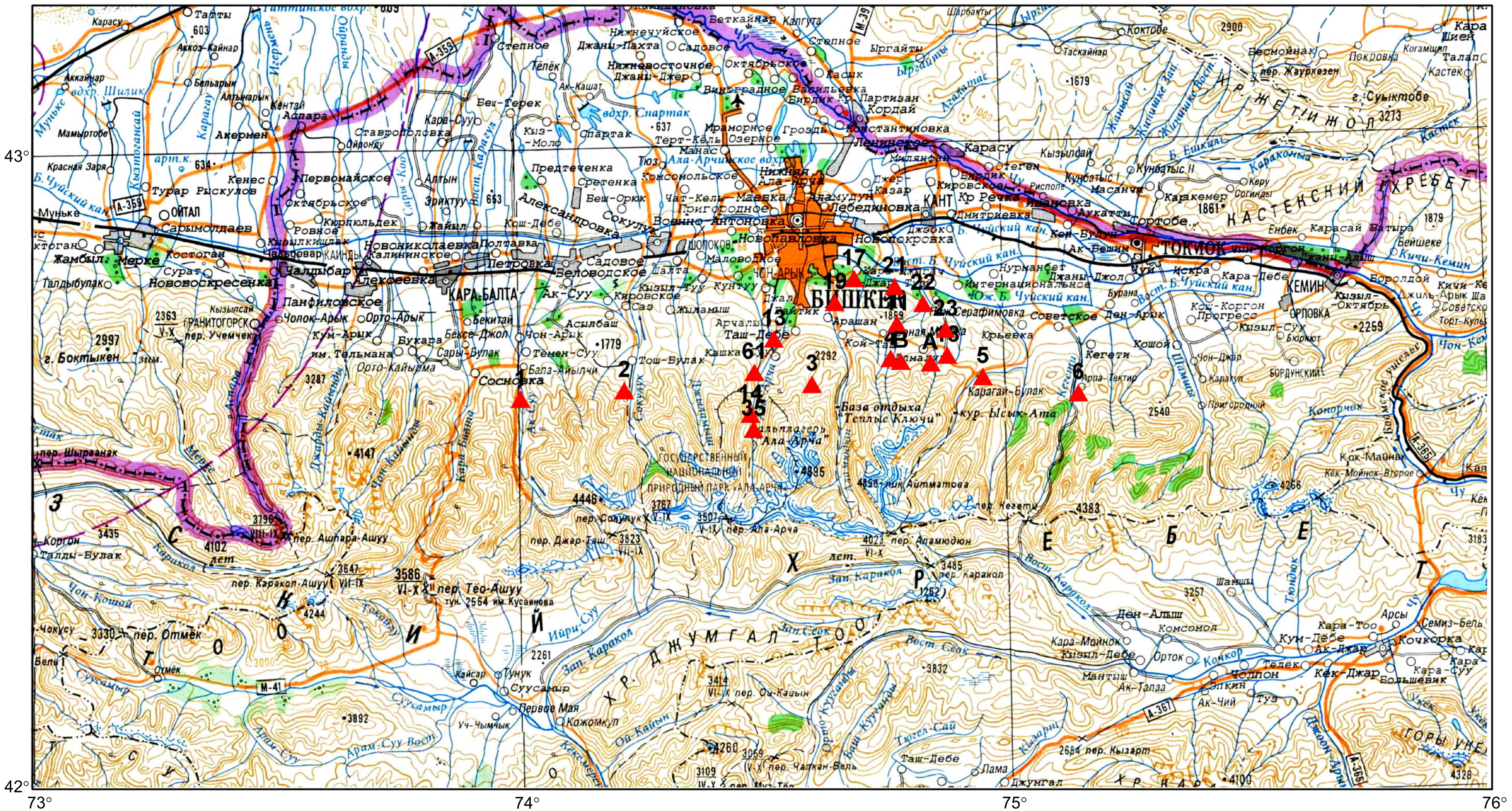

Рис. 1. Схема расположения пунктов электромагнитных наблюдений на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП).

Стационары электромагнитного мониторинга: 1 – Ак-Суу, 2 – Шавай, 3 – Чон-Курчак, 4 – Таш-Башат, 5 – Иссык-Ата, 6 – Кегеты. *Стационары магнитотеллурического мониторинга*: 1 – Ак-Суу, 3 – Чон-Курчак. *Рядовые пункты*: 11 – Норуз, 13 – Кашкасу, 14 – Ала-Арча средняя, 17 – Ала-Тоо, 18 – Тогузбулак, 19 – Скважина 1152, 21 – Дачи, 22 – Серафимовка нижняя, 23 – Серафимовка верхняя, 35 – Ала-Арча верхняя, 61 – верхняя Шлагбаум, А – Алмаз, В – База.

Fig. 1. Schematic map showing the locations of electromagnetic observation sites on the Bishkek geodynamic test area.

Electromagnetic monitoring stations: 1 – Ak-Suu, 2 – Shavai, 3 – Chon-Kurchak, 4 – Tash-Bashat, 5 – Issyk-Ata, 6 – Kegety. Magnetotelluric monitoring stations: 1 – Ak-Suu, 3 – Chon-Kurchak. Monitoring sites: 11 – Noruz, 13 – Kashkasu, 14 – Middle Ala-Archa, 17 – Ala-Too, 18 – Toguzbulak, 19 – Borehole 1152, 21 – Dachi, 22 – Lower Serafimovka, 23 – Upper Serafimovka, 35 – Upper Ala-Archa, 61 – Upper Shlagbaum, A – Almaz, B – Baza.

естественных и искусственных электромагнитных полей Земли могут отражать процессы подготовки сейсмических событий, что позволяет использовать их для мониторинга геодинамических процессов.

Традиционно используются два подхода: первый – выявление электромагнитных сигналов, генерируемых механоэлектрическими и другими преобразованиями при подготовке землетрясений; второй – выявление изменений в геоэлектрическом разрезе среды под воздействием тектонических процессов. При рассмотрении возможностей различных методов электроразведки для проведения электромагнитного мониторинга на стационарах Бишкекского геодинамического полигона (БГП) было предложено комплексирование методов с контролируемыми и естественными источниками, имеющих разную глубинность исследования: зондирований становлением поля в дальней зоне (ЗСД) и магнитотеллурических зондирований (МТЗ). Следует отметить, что этот комплекс традиционно успешно применяется при нефтепоисковых работах во всем мире [*Ingerov, 2005; Epov et al., 2014; Yakovlev, 1991*] в связи с тем, что, как правило, данные ЗС и МТЗ существенно дополняют друг друга. Это обстоятельство вселяет уверенность, что использование комплекса электроразведочных методов ЗС и МТЗ для мониторинга современных геодинамических процессов, связанных с подготовкой сейсмических процессов, может быть успешным. Каждый метод имеет свои преимущества: данные ЗС более детально отражают верхнюю и среднюю часть земной коры от приповерхностных слоев до глубин 15–20 км (в зависимости от геоэлектрических условий и параметров генераторно-приемных установок). Применяя различные модификации метода МТЗ, можно получить информацию о глубинном строении литосферы, как показывает опыт, от первых десятков метров до 100 км и более.

Основной целью проводимых исследований является повышение эффективности электромагнитного мониторинга за счет развития новых подходов к анализу существующих данных. Для достижения цели решались следующие задачи:

1) анализ результатов комплексной интерпретации данных МТЗ, ЧЗ и ЗСД (с использованием фондовых материалов) для стационарных пунктов электромагнитного мониторинга Чон-Курчак и Ак-Суу для выявления интервалов глубин, наиболее чувствительных к изменению электромагнитных параметров среды;

2) оценка геоэлектрических характеристик скрытых разломных структур и геоэлектрической сегментации территории мини-полигона Кентор (профильный мониторинг) на основе детализационных исследований верхней части разреза;

3) анализ временных рядов электромагнитных параметров на предмет взаимосвязи пространственно-временного распределения сейсмичности и вариаций электропроводности.

2. Система геофизического мониторинга Бишкекского геодинамического полигона

Исторически сложилось так, что для метода зондирования становлением поля на момент создания БГП (рис. 1) была достигнута гораздо более высокая разрешающая способность, нежели для метода магнитотеллурического зондирования (рис. 2), поэтому задача мониторинга состояния земной коры (через вариации кажущегося электрического сопротивления) изначально решалась с помощью метода ЗСД с применением достаточно мощного контролируемого источника возбуждения электромагнитного поля. Суть этого метода заключается в изучении неустановившегося поля, или поля переходных процессов, при импульсном возбуждении в земле электромагнитного поля. Из существующих четырех модификаций ЗСД (различных комбинаций электрического заземленного диполя и незаземленного контура – «петли») наиболее приемлемым в условиях сильно расчлененного, сложного горного рельефа Северного Тянь-Шаня оказался вариант «диполь-диполь», когда в качестве питающей линии AB и приемной MN используются соответственно электрический кабель длиной 4200 м и геофизический провод длиной от 50 до 1000 м. Как показали результаты дальнейших исследований, выбор модификации глубинных зондирований «диполь-диполь» оправдал себя:

– момент диполя ($M=I\times AB=600\times4200=2.52\times10^6$, А×м) «обеспечил» необходимую глубинность зондирования до 20 км (особенно в южной части полигона, в зоне развития палеозойских пород, что является благоприятным геологическим разрезом и хорошими условиями приема сигнала при проведении работ метом ЗС);

– существенно увеличилась территория, охваченная режимными наблюдениями: при одном положении питающего диполя можно проводить наблюдения в радиусе 60 км;

– стало возможным слежение за развитием деформационных процессов (через вариации кажущегося электрического сопротивления) как по площади, так и по глубине.

Вместе с тем МТЗ как метод, ориентированный на исследование земной коры и верхней мантии, дает возможность контролировать электромагнитные характеристики среды в более широком частотном диапазоне, а следовательно, и на гораздо

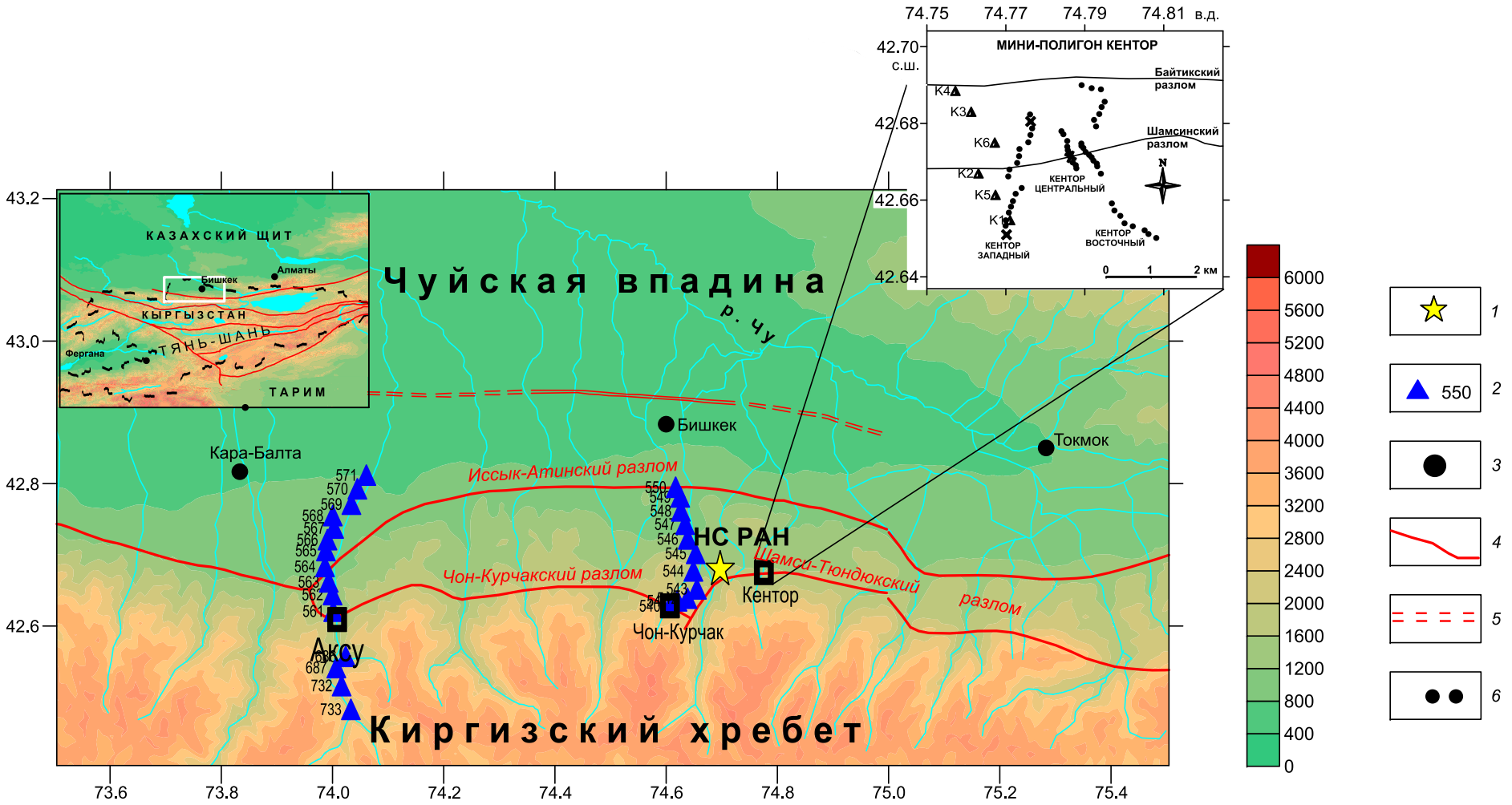

Рис. 2. Топографическая карта Северного Тянь-Шаня (часть территории Бишкекского геодинамического полигона).

1 – Научная станция РАН; *2* – пункты зондирования детализационных профилей МТЗ [*Rybin et al., 2008*]; *3* – основные разрывные нарушения; *4* – крупные населенные пункты; *5* – Центрально-Чуйская флексурно-разрывная зона; *6* – пункты профильного мониторинга. На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано расположение Бишкекского геодинамического полигона и региональные профили МТЗ; в правом – расположение мини-полигона Кентор с вынесенными профилями профильного МТ-полигона и пунктами светодальномерных наблюдений.

Fig. 2. Topographic map of the Northern Tien Shan (part of the territory of the Bishkek geodynamic test area).

1 – Research Station of RAS; *2* – sounding sites of MTS detail profiles [*Rybin et al., 2008*]; *3* – major faults; *4* – large settlements; *5* – Central Chuya flexure-rupture zone; *6* – profile monitoring sites. Inset in the upper left corner: light rectangular box – Bishkek geodynamic test area, and the regional MTS profiles. Inset in the right corner: Kentor mini-polygon, and the profiles of the profile MT-polygon and the optical distance monitoring sites.

Geodynamics & Tectonophysics 2018 Volume 9 Issue 2 Pages 461–487

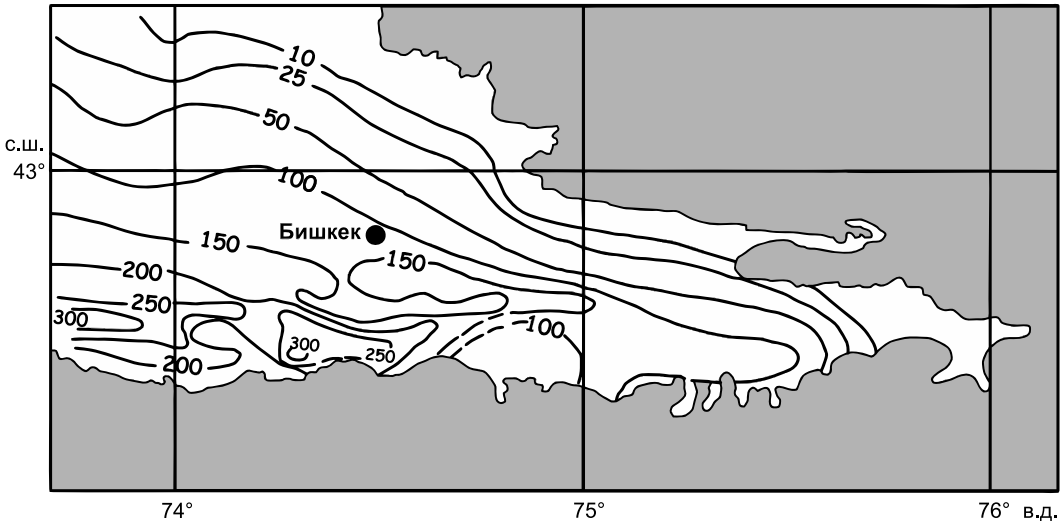

Рис. 3. Карта суммарной продольной проводимости (S) осадочного чехла Чуйской впадины по данным ВЭЗ и ДЭЗ.

Fig. 3. Map of the total longitudinal conductivity (S) of the sedimentary cover in the Chuya depression according to the VES and DES data.

большие глубины и регистрировать дополнительные электромагнитные параметры. Внедрение в практику мониторинговых МТ-исследований, основанных на изучении электромагнитных полей естественного происхождения, позволяет получать сведения о вариациях электропроводности вещества литосферы Земли. Этот физический параметр весьма чувствителен к наличию пористости и трещиноватости горных пород, концентрации и минерализации флюидов, реологии и фазовому состоянию вещества, а также вещественному составу пород в верхней части коры. На первом этапе работ нами были проведены обширные экспериментальные исследования в диапазоне периодов МТ-поля от 0.01 до 1800 с. Для оценки суммарной продольной проводимости коры привлекались результаты МТ-исследований коллег Института сейсмологии НАН КР (рис. 3) [*Melnikova, 1991*].

В геоэлектрических условиях такого сложноустроенного региона, как Тянь-Шань, особенно важно качество экспериментального материала, поэтому на качественном этапе интерпретации был осуществлен анализ всех данных, полученных при выполнении электромагнитных зондирований (рис. 4). При этом оценивались не только точность измерений и возможные искажения наблюденных кривых, но и их корреляция между собой. В результате проведенных исследований были выбраны пункты, в которых получены наиболее полные неискаженные полевые кривые. В дальнейшем они были использованы как стационарные пункты мониторинговых наблюдений, для которых на основании результатов электромагнитных зондирований (ЗСД) и данных параметрических скважин были построены геоэлектрические модели [*Bragin, 2001*]. Затем эти модели дорабатывалась и уточнялись в процессе интерпретации с учетом данных МТЗ (рис. 5). Вопрос о возможности получения количественной информации о распределении электропроводности (σ) с глубиной в условиях региональной и локальной геологической неоднородности верхних горизонтов земной коры высокогорного региона решался с помощью математического моделирования (рис. 6, 7) [*Batalev et al., 1989; Rybin et al., 2008; Rybin, 2011*].

Система электромагнитного мониторинга (см. рис. 1) изменений напряженно-деформационного состояния земной коры методом ЗСД включает в себя шесть стационарных пунктов (с частотой измерений пять раз в день) и 17 режимных пунктов (с частотой измерений 2–3 суток). В качестве генераторной установки для проведения глубинных зондирований используется электроимпульсная система ЭРГУ-600-2, разработанная НС РАН (http://leo.gdirc.ru). Данная система питается от промышленных линий электропередачи (400 V) и может обеспечивать переменный ток заданной формы в генераторном контуре, в зависимости от решаемой задачи, от 50 до 1200 А. При штатных зондированиях используется последовательность разнополярных прямоугольных импульсов амплитудой 600 А и периодом 10 с, которая в условиях БГП позволяет получать информацию о геодинамических процессах в земной коре до глубин 20 км (рис. 8, 9). Приемными станциями служат электромагнитные станции типа ИК-1 с большим динамическим диапазоном (140 дб) (http://leo.gdirc.ru).

В качестве исходного материала для анализа поведения сейсмичности на территории БГП исполь-

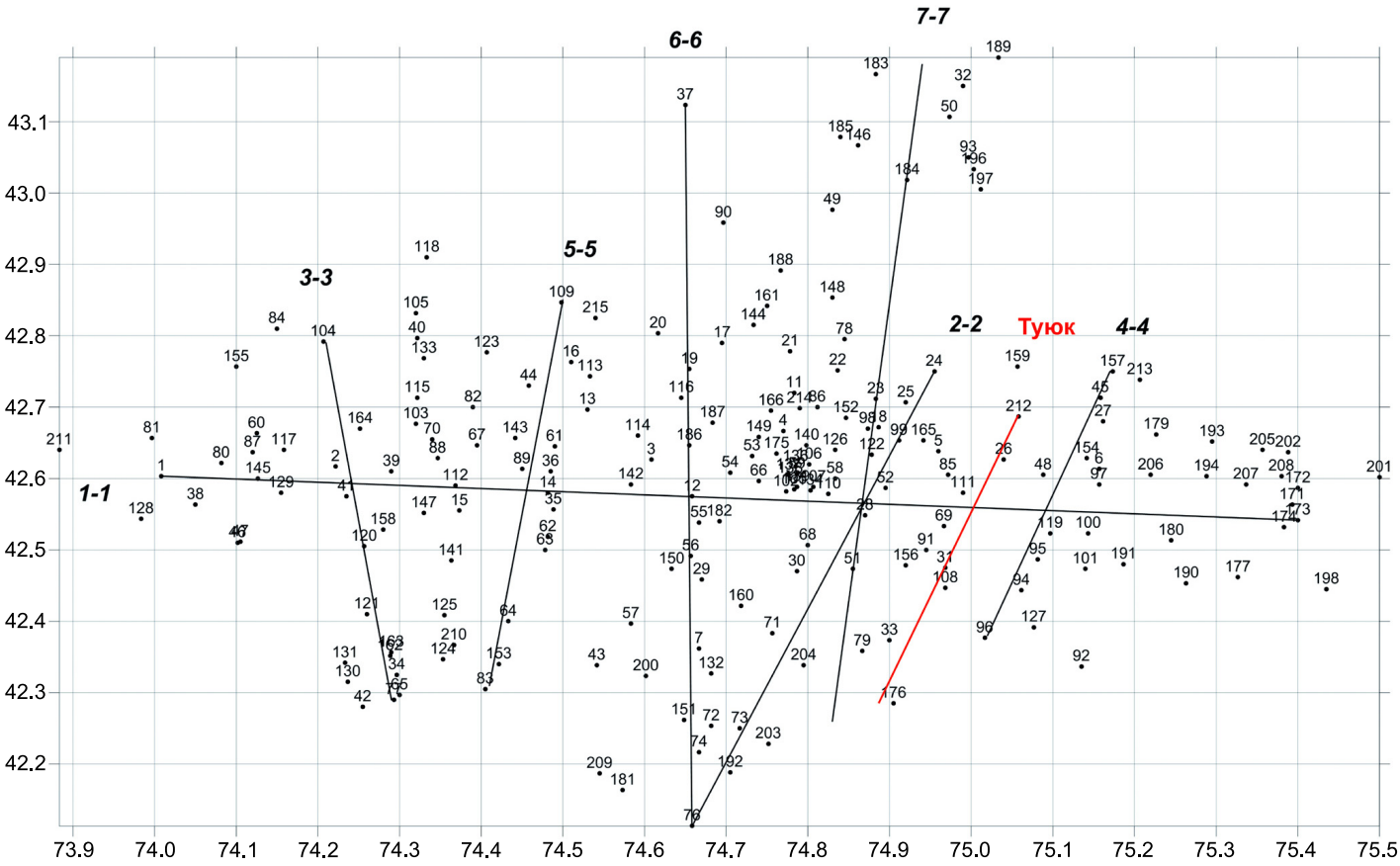

Рис. 4. Схема расположения пунктов зондирования ЧЗ и ЗСД для территории Бишкекского геодинамического полигона.

Fig. 4. Locations of the FS and SFZ sites on the Bishkek geodynamic test area.

зовался региональный сейсмический каталог, составленный Научной станцией РАН по данным цифровой сети KNET, работающей в режиме реального времени с 1991 года по настоящий момент. Для исследования выбрана территория в пределах 41.5–43.5° с.ш., 73–77° в.д. (территория БГП), где чувствительность сети KNET достаточна для регистрации событий энергетических классов K≥7. Система сейсмологических наблюдений состоит из десяти цифровых широкополосных автоматических телеметрических станций, двух радиоретрансляторов и трех центров сбора и обработки сейсмологической информации. Для измерений применяются датчики Streckeisen STS-2 с регистраторами REF TEK72-6, которые обеспечивают регистрацию сейсмического сигнала в большом динамическом диапазоне (140 дб) и широкой полосе частот (0.008–50.00 Гц) (http://leo.gdirc.ru).

Система МТ- мониторинга БГП включает в себя:

а) два стационарных пункта наблюдений (см. рис. 1) – Ак-Суу и Чон-Курчак, где осуществляется непрерывная регистрация МТ-поля на встроенную флеш-память измерительной аппаратуры, продолжительность записи зависит от объема флеш-памяти и параметров регистрации, при максимальной частоте опроса продолжительность записи составляет порядка 20 суток, после чего производится копирование данных с флеш-памяти на ноутбук, техническое обслуживание аппаратуры и ее перезапуск;

б) сеть профильных наблюдений на мини-полигоне Кентор (см. рис. 2, врезка справа); при проведении работ профильного МТ-мониторинга режим измерений зависит от задач исследования и носит сезонный характер – две сессии (весна и осень);

в) режимные пункты МТ-мониторинга, расположенные в наиболее тензочувствительных зонах и на профилях. Временной интервал регистрации МТ-поля составляет от нескольких часов до нескольких суток, что определяет глубинность зондирований.

Таким образом, на территории БГП созданы все условия для успешного исследования вариаций электромагнитных параметров во времени как неотъемлемой части комплексного геофизического мониторинга, основная цель которого – выявление

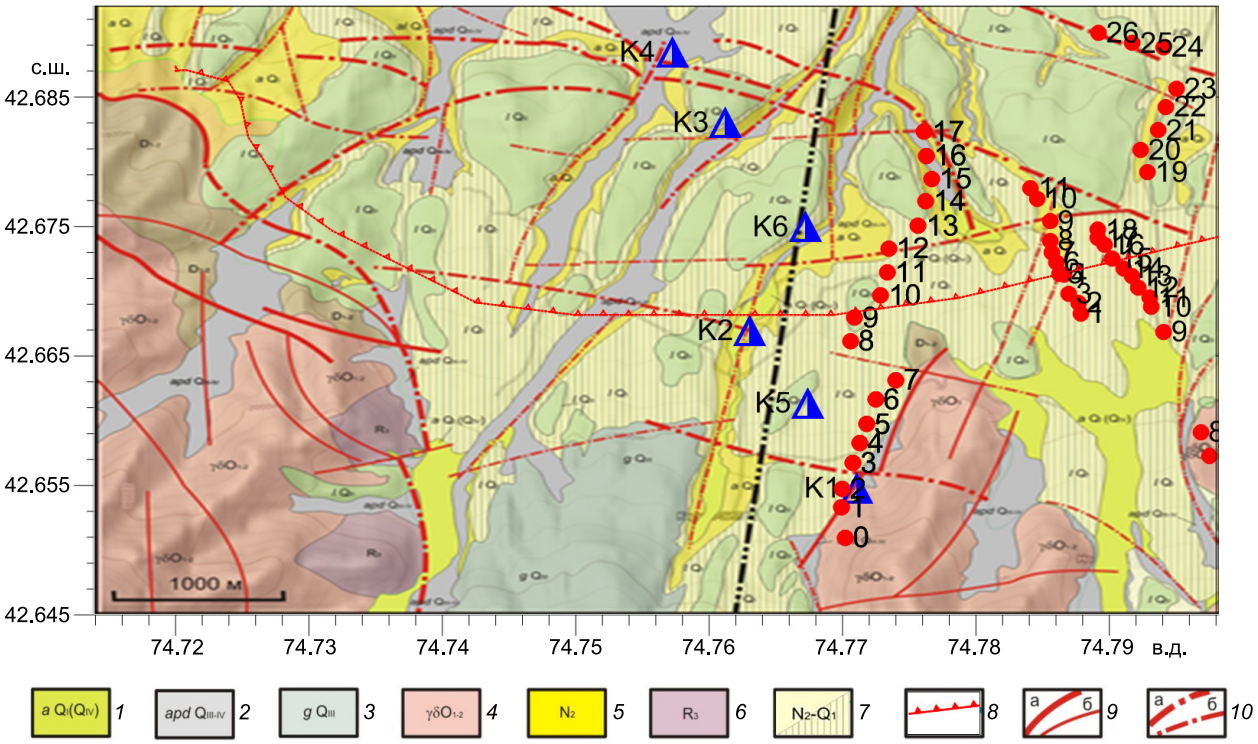

Рис. 5. Расположение магнитотеллурических профилей системы профильного мониторинга (красные кружки) и сети геодезических пунктов (синие треугольники) на геологической схеме (по [*Przhiyalgovsky, Kuzikov*, *2015*]) участка «Кентор» (пос. Уч-Эмчек, р. Ноорус).

1 – современные аллювиальные валунно-галечные отложения; *2* – аллювиальные валунно-галечные отложения первой надпойменной террасы; *3* – глыбово-галечные гляциальные отложения; *4* – ранне- и среднеордовикские гранодиориты; *5* – миоценовая галечно-дресвяно-песчаная толща; *6* – рифейские комплексы нерасчлененные; *7* – плиоцен-плейстоценовые аллювиальные валунные отложения шарпылдакской серии; *8* – Шамсинский разлом; *9* – активизированные разломы и зоны трещиноватости фундамента: а – главные; б – второстепенные; *10* – активизированные разломы, предполагаемые под чехлом современных отложений: а – главные; б – второстепенные.

Fig. 5. Geological schematic map of the Kentor site (Uch-Emchek settlement, and the Noorus river) (after [*Przhiyalgovsky, Kuzikov*, *2015*]) showing the locations of the magnetotelluric profiles of the profile monitoring system (red circles) and the networks of geodetic points (blue triangles).

1 – modern alluvial boulder-pebble deposits; *2* – alluvial boulder-pebble deposits of the first above-flood terrace; *3* – blocky-pebble glacial deposits; *4* – Early and Middle Ordovician granodiorite; *5* – Miocene pebble-crumbly-sandy strata; *6* – Riphean complexes (undivided); *7* – Pliocene–Pleistocene alluvial boulder deposits of the Sharpyldak series; *8* – Shamsi frault; *9* – activated faults and fracture zones of the basement: a – main; б – secondary; *10* – activated faults assumed under the cover of modern sediments: a – main; b – secondary.

взаимосвязи геодинамических процессов, происходящих в литосфере и верхней мантии, и изменений геофизических полей.

3. Геолого-геофизическая изученность территории БГП

Зона сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины представляет собой крупнейший линейный структурный элемент Тянь-Шаня, который определяет структурно-формационную делимость литосферы и характер современной тектонической активности территории Бишкекского геодинамического полигона. Наиболее крупными структурами региона исследований являются (с севера на юг): Иссык-Атинский, Чон-Курчакский и Шамси-Тюндюкский разломы, положение которых неоднозначно у разных авторов [*Thompson et al., 2002; Bullen et al., 2003; Mikolaichuk et al., 2003; Laverov, Makarov, 2005*]. При этом Научная станция РАН (НС РАН) имеет значительный опыт изучения разломных структур, в том числе и скрытых, или зон динамического влияния разломов как на территории Бишкекского геодинамического полигона, Алтайского сейсмологического полигона, так и на сопредельных территориях [*Bataleva, 2005, 2016; Bataleva et al., 2006a, 2006b, 2017; Buslov et al., 2007; Novikov et al., 2008; Batalev et al., 2013; Bataleva, Batalev, 2015*]. Использование современных подходов

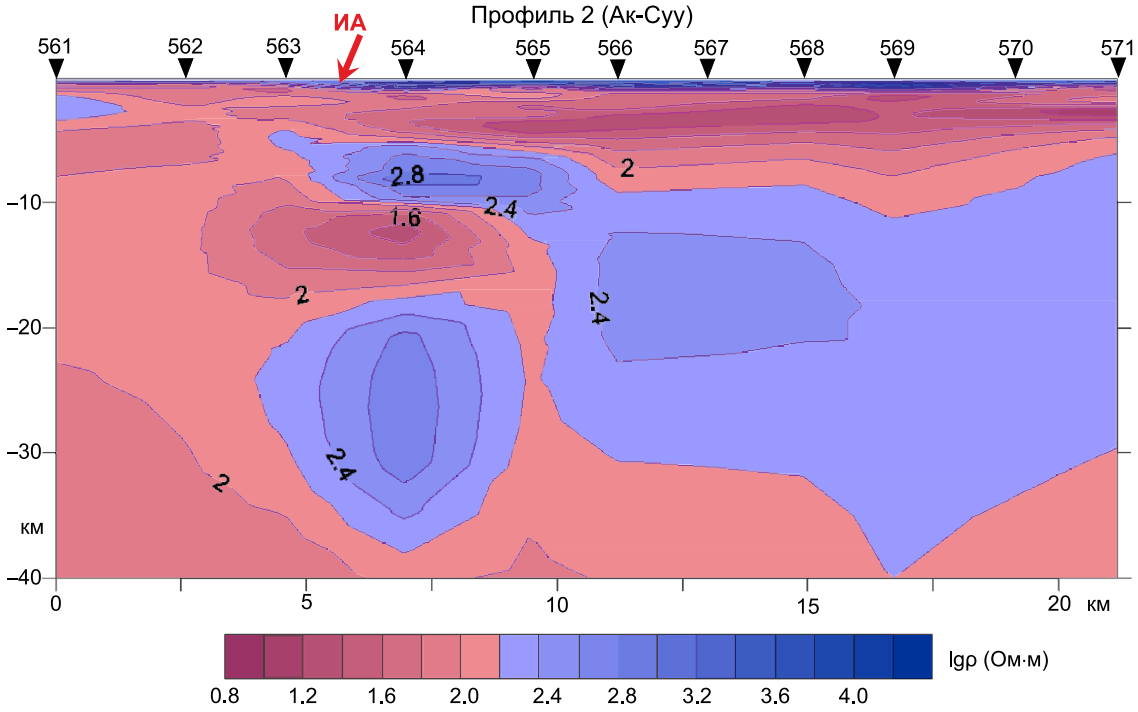

Рис. 6. Детализационный профиль (по данным МТЗ) в зоне стационара Чон-Курчак (см. рис. 2), изолинии отображают десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м. Треугольники – пункты зондирований, ИА – местоположение Иссык-Атинского разлома.

Fig. 6. Detailed profile (based on the MTS data) for the zone of the Chon-Kurchak station (see Fig. 2). Isolines – decimal logarithm of the specific resistivity (Ohm·m); triangles – sounding points; ИА – Issyk-Ata fault.

к интерпретации электромагнитных данных позволяет выявить основные особенности строения зон разломов, уточнить пространственное положение разломной структуры и определить зону динамического влияния разломов. В связи с этим уточнение тектонического строения осадочного чехла и палеозойского фундамента выполнялось с использованием комплекса электроразведочных методов МТЗ и ЗСД. Примечательно то, что в подтверждение современных детализационных геофизических исследований на НС РАН существует внушительный объем фондовых материалов по электрометрии (ВЭЗ, ЧЗ, ЗСД), полученных на территории БГП в конце прошлого столетия (см. рис. 4), на основании которых построены геоэлектрические разрезы и определены основные электромагнитные параметры геологической среды. Для интерпретации электрометрических данных использовалась автоматизированная система ЭРА, разработанная в лаборатории электромагнитных полей ИГиГ СО РАН [*Epov et al., 1990; Epov, Eltsov, 1992*].

На построенных по произвольно выбранным профилям, преимущественно субмеридионального направления, геоэлектрических разрезах проявились некоторые особенности строения БГП. Наиболее четко указанные особенности были выражены на разрезах, построенных по результатам ЧЗ и ЗСД, на основании чего выделены три проводящих горизонта: 1) с удельным электрическим сопротивлением 1–20 Ом·м и мощностью 1–3 км на глубинах 1–5 км, был интерпретирован как низкоомные отложения палеоген-неогена; 2) с удельным сопротивлением 10–50 Ом·м и мощностью 0.5–1.0 км, был выделен на глубине 8–12 км, в основном в южной части полигона (верхний коровый проводник); 3) кровля третьего (нижнего корового проводника) с сопротивлением 10–50 Ом·м определялась на глубине 20–25 км лишь на некоторых тектонических структурах южной части полигона. Наличие всех проводящих горизонтов подтверждается данными МТЗ. Следует отметить, что вышеуказанные верхний и нижний коровые проводники коррелируются с волноводами, выделенными по сейсмическим данным [*Velikhov, Zeygarnik, 1993*].

На основе анализа публикаций и отчетных материалов по проведению полевых исследований установлено, что выделенные на территории мини-полигона Кентор-Байтикский и Шамси-Тундукский (Шамсинский), а также Чонкурчакский и Аламединский разломы представляют собой гетерогенные флексурно-разломные зоны, которые на различных участках могут быть выражены по-раз-

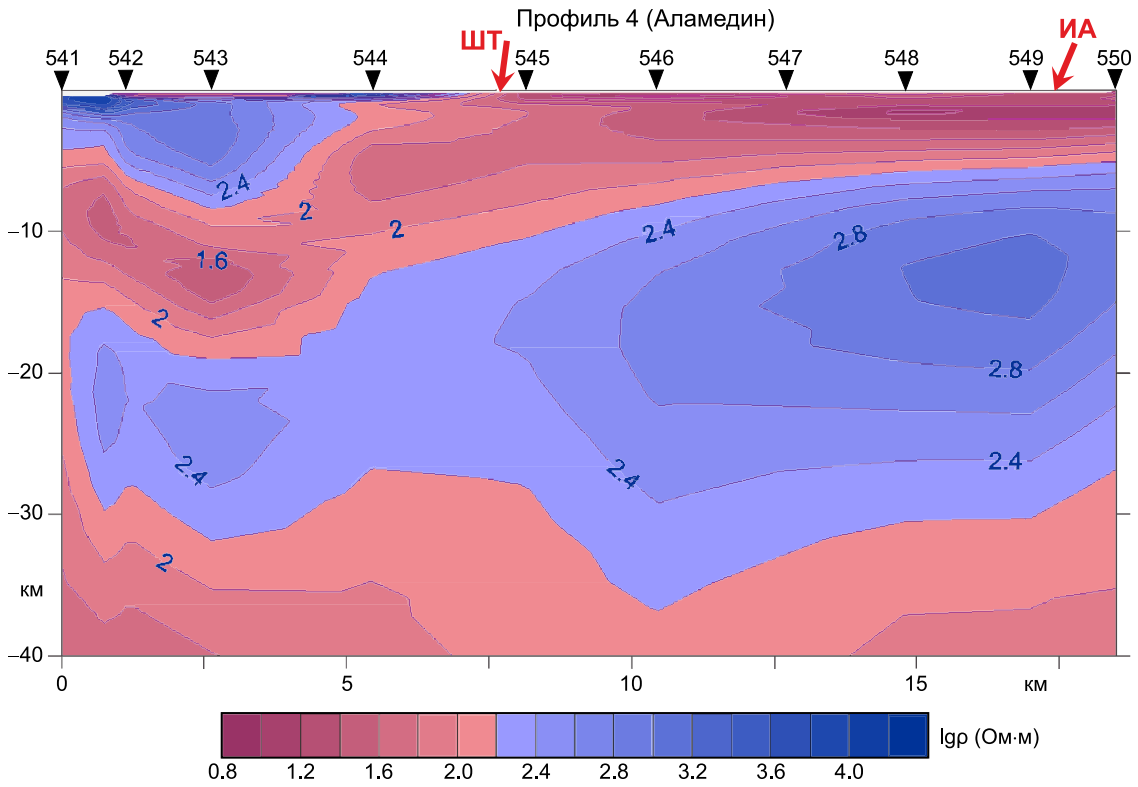

Рис. 7. Детализационный профиль (по данным МТЗ) в зоне стационара Ак-Суу (см. рис. 2), изолинии отображают десятичный логарифм удельного сопротивления в Ом·м. Треугольники – пункты зондирований, ИА – местоположение Иссык-Атинского разлома, ШТ – местоположение Шамси-Тундукского разлома.

Fig. 7. Detailed profile (based on the MTS data) for the zone of the Ak-Suu station (see Fig. 2). Isolines – decimal logarithm of the specific resistivity (Ohm·m); triangles – sounding points; ИА – Issyk-Ata fault; ШТ – Shamsi-Tunduk fault.

ному (разломными структурами, ступенями-террасами и др.) Главные неотектонические линейные зоны возникли и проявляли тектоническую активность в разное время. Опыт современных морфоструктурных и структурных исследований, выполненных на отдельных участках БГП [*Thompson et al., 2002; Bullen et al., 2003; Mikolaichuk et al., 2003; Laverov, Makarov, 2005; Rybin et al., 2005; Safronov et al., 2006; Makarov et al., 2010; Przhiyalgovsky, Kuzikov, 2015*], показал необходимость большей детальности и точности полевого изучения деформаций кайнозойских поверхностей выравнивания при определении амплитуд и направлений новейших смещений. В процессе детальных работ изучались структурно-кинематические и морфоструктурные парагенезы для мини-полигона Кентор (см. рис. 5), отражающие особенности кинематики деформаций и реологические свойства горных масс на разных этапах тектонической эволюции, что особенно актуально при выполнении экспериментальных работ, связанных с определением корреляции между изменениями длины базовых линий, приливными воздействиями, $\rho_к$ и фазы импеданса.

Проведенные геолого-геодезические исследования позволяют предполагать рассеянный характер смещений хрупкопластичного свойства в палеозойском фундаменте (преимущественно гранитоидном) в пределах широкой зоны предгорий. На рассмотренных участках ордовикские граниты и гранодиориты интенсивно дезинтегрированы. Именно это обстоятельство позволяет объяснить низкое сопротивление горных пород палеозоя на геоэлектрических разрезах, особенно в приразломных зонах [*Rybin et al., 2016a, 2016b; Bataleva et al., 2017*]. Степень дезинтеграции максимальна вдоль широтных региональных разломов сдвиго-взбросовой кинематики южного ограничения Южно-Чуйской зоны активизации (Шамсинского, Чонкурчакского) и постепенно, на расстоянии от первых сотен метров до 1 км, убывает к северу и югу от тектонического нарушения [*Rybin et al., 2016b*].

Для исследуемой территории Бишкекской локальной GPS-сетью установлено, что современные движения земной коры за 1997–2014 гг. наблюдений зависят от сложившейся тектонической структуры района [*Przhiyalgovsky, Kuzikov, 2015*]. При пересечении Южно-Чуйской зоны с юга на север от палеозойских пород (северный склон Киргизского хребта до Шамсинского надвига) через кайнозойский блок предгорий (до Иссыкатинского взброса)

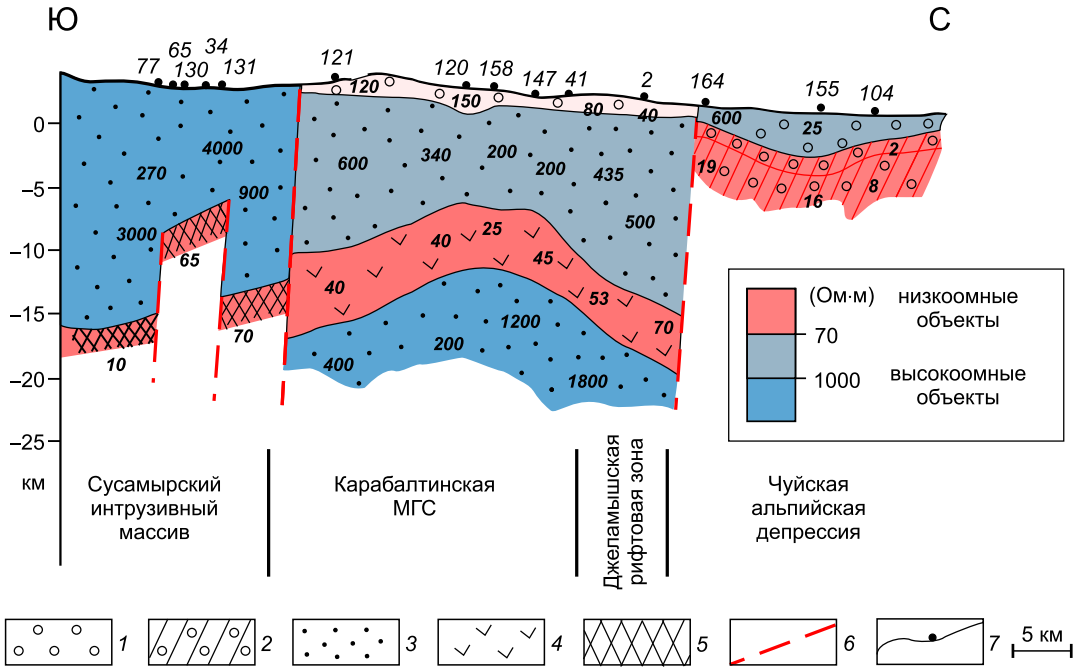

Рис. 8. Схематический геоэлектрический разрез по линии 3-3 (по данным электромагнитных зондирований ЧЗ и ЗСД [*Report..., 1994*]).

1 – высокоомные кайнозойские (Q) отложения Чуйской впадины; *2* – неоген-палеогеновые отложения; *3* – высокоомный фундамент; *4* – вулканогенные отложения (?); *5* – электропроводящий горизонт; *6* – разломные нарушения по данным электрометрии; *7* – пункты электромагнитных зондирований.

Fig. 8. Schematic geoelectrical section along Line 3-3 (based on the electromagnetic soundings data, FS and SFZ [*Report..., 1994*]).

1 – high-resistance Cenozoic (Q) deposits of the Chuya depression; *2* – Neogene–Paleogenic deposits; *3* – high-resistance basement; *4* – volcanogenic deposits (?); *5* – electrically conductive horizon; *6* – faults according to the electrometry data; *7* – electromagnetic sounding sites.

к области распространения четвертичных образований Чуйской впадины в среднем наблюдается уменьшение трех компонент скорости (в мм/год): северной (от 2.23 до 0.67), восточной (от –0.79 до –1.00) и вертикальной (от 1.01 до 0.05) [*Przhiyalgovsky, Kuzikov, 2015*]. Эти данные свидетельствуют о тектонической активности современного этапа развития исследуемой территории, что является благоприятным условием для проведения мониторинговых исследований.

Детальное структурно-геологическое картирование также было выполнено для стационаров МТ-мониторинга [*Rybin et al., 2008, 2016b*]: 1) в районе долины р. Чонкурчак, что позволило определить строение Аламединского разлома, который отчетливо проявляется при структурном дешифрировании детальных спутниковых ландшафтных снимков, и уточнить его положение в процессе наблюдений на местности. Зона субпараллельных разрывных нарушений (прямолинейных и дуговых в плане) протягивается параллельно крутому склону и гребню хребта, ограничивающего Чонкурчакскую котловину и область распространения палеогеновых красноцветов с юго-запада. Разлом проявлен в виде зон интенсивного катаклаза и милонитизации в ордовикских гранодиоритах; 2) в районе стационара Ак-Суу, который расположен вблизи наиболее активного разлома Северного Тянь-Шаня – Иссык-Атинского, где происходят основные сейсмотектонические подвижки. Он выделяется как структурная линия, разделяющая предгорья Киргизского хребта и равнинную часть Чуйской впадины, протягивающаяся от долины р. Аксу на западе до восточного замыкания Чуйской впадины. Общая длина разлома составляет более 150 км. Исследования, выполненные в работе [*Abdrakhmatov et al., 2007*], показали, что общее вертикальное смещение в долине р. Сокулук составляет 6.3 м. Разлом представляет собой надвиг, падающий к югу под углом 25°, скорость смещений составляет (0.6–0.9)±(0.2–0.3) мм/год. На западе, в районе долины р. Аксу, разлом исчезает под рыхлыми накоплениями Чуйской впадины, на востоке проходит вдоль границы низких предгорий, где его линия также исчезает под рыхлыми наносами. Иссык-Атинский разлом служит северной границей зоны

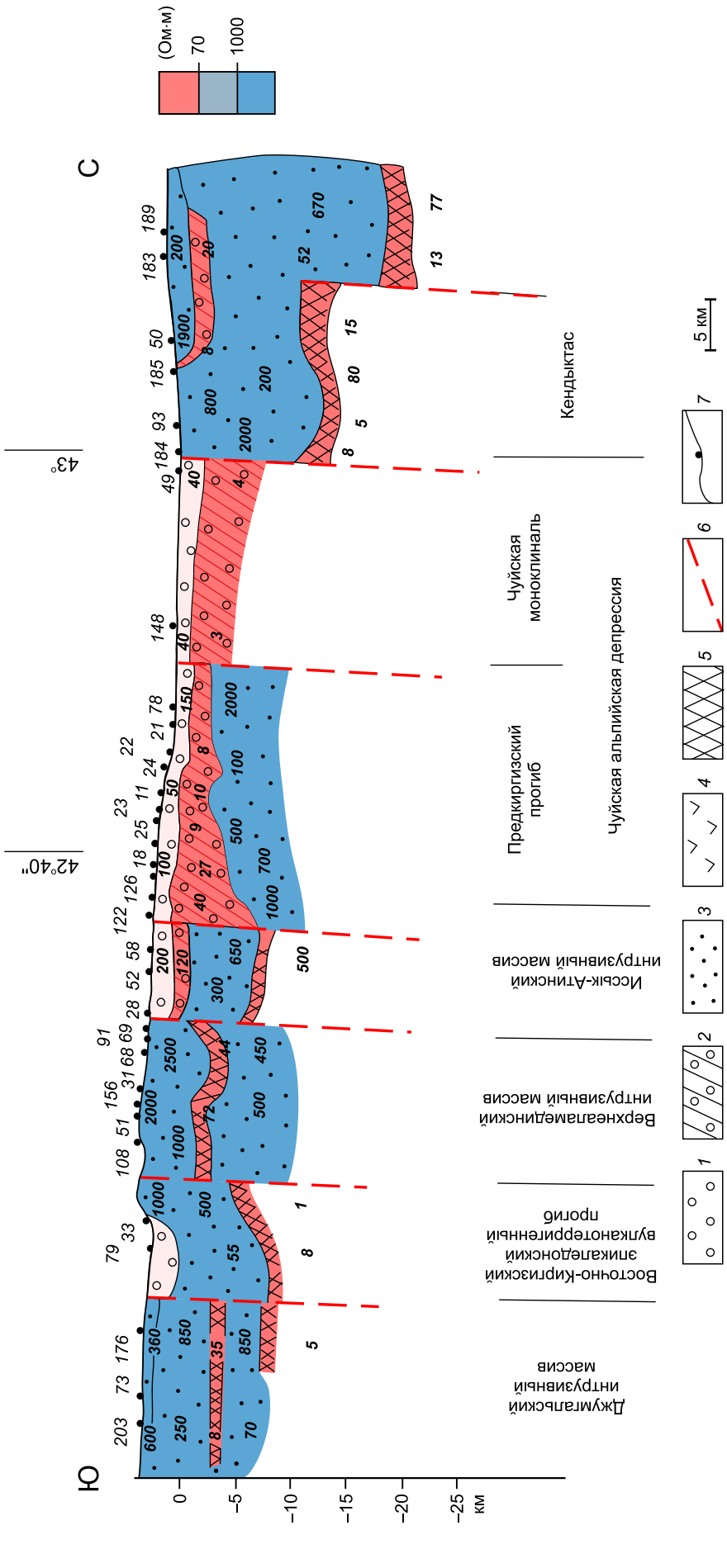

Рис. 9. Схематический геоэлектрический разрез по линии 7-7 (по данным электромагнитных зондирований ЧЗ и ЗСД [*Report..., 1994*]).

1 – высокоомные кайнозойские (Q) отложения Чуйской впадины; *2* – неоген-палеогеновые отложения; *3* – высокоомный фундамент; *4* – вулканогенные отложения (?); *5* – электропроводящий горизонт; *6* – разломные нарушения по данным электрометрии; *7* – пункты электромагнитных зондирований.

Fig. 9. Schematic geoelectrical section along Line 7-7 (based on the electromagnetic soundings data, FS and SFZ [*Report..., 1994*]).

1 – high-resistance Cenozoic (Q) deposits of the Chuya depression; *2* – Neogene–Paleogenic deposits; *3* – high-resistance basement; *4* – volcanogenic deposits (?); *5* – electrically conductive horizon; *6* – faults according to the electrometry data; *7* – electromagnetic sounding sites.

деформаций, объединяемой в Южно-Чуйскую структурную зону, составлен из нескольких кулис, и по нему устанавливаются надвиговые смещения в неогене и квартере [*Rybin et al., 2016b*].

Методика профильных магнитотеллурических зондирований. С целью исследования разрывных нарушений взбросового и надвигового типа были выполнены магнитотеллурические зондирования вдоль профиля на 18 пунктах (см. рис. 5, профиль слева). Локальный профиль «Кентор Западный» пересекает Байтикскую впадину в субмеридиональном направлении, его протяженность составляет почти 4 км, шаг зондирований – 200 м. Частотный диапазон зондирований профиля расширен за счет использования АМТЗ, что позволило детально исследовать верхнюю часть и оценить влияние рельефа на построение разреза, перепад которого вдоль профиля составляет 500 м (см. рис. 1). Измерения выполнялись с помощью аппаратуры Phoenix MTU-5 [*Fox, 2001*]. Регистрирующие блоки станций используют 24-разрядный АЦП и GPS-приемники, обеспечивающие синхронизацию по времени с точностью 1 мкс. Диапазон измеряемых вариаций магнитотеллурического поля составляет от 0.001 до 1800 с. Средняя длительность записи 24–36 часов. Измерение трех компонент магнитного поля проводилось с помощью штатных индукционных датчиков МТС-50. Компоненты электрического поля измерялись диполями длиной 50 м, заземленными неполяризующимися электродами с марганцево-угольной крошкой, разработанными и запатентованными НС РАН [*Losikhin et al., 2013*]. Обработка записей проводилась в программе EPI-KIT геофизической компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва), в основе которой лежит математическое вычислительное ядро, основанное на корреляционном методе и робастной статистике. Следует отметить, что при нахождении разных передаточных функций алгоритм фокусируется на различных типах помех, поэтому каждая передаточная функция рассчитывается особым образом [*Zhdanov, 1986; 2007*].

Для подавления некоррелируемой помехи в записях магнитных и электрических каналов двух синхронных записей был использован алгоритм обработки в режиме двухточечных зондирований с удаленной базой [*Goubau et al., 1978; Safonov, Bubnov, 1979*]. Совместно с робастной статистикой этот метод дает хорошие результаты [*Jones et al., 1989*]. В качестве удаленной базы использовались синхронные записи стационарного пункта МТ-мониторинга (пункт Ак-Суу, удаление около 60 км). Для получения итоговой средней кривой использовалась сплайн-аппроксимация, выполненная с помощью программы MT-Corrector, разработанной сотрудниками российской геофизической компании «Северо-Запад». При проведении сплайнов использовался набор полученных оценок из 20 реализаций SSMT-2000 и 10 реализаций EPI-KIT. Программа MT-Corrector позволяет контролировать дисперсионные соотношения, связывающие модуль и фазу компонент тензора импеданса. Для большинства записей дисперсионные соотношения выполняются, за исключением частотных диапазонов с повышенной зашумленностью записей (диапазон периодов 10–20 с и самые низкие частоты). Такое выполнение дисперсионных соотношений для кривых профиля «Кентор Западный» может свидетельствовать в пользу предположения о квазидвумерности геоэлектрических структур профильного разреза.

Двумерная сглаживающая инверсия МТ-данных. Инверсия по профилю «Кентор Западный» была выполнена в программе Rodi-Mackie [*Rodi, Mackie, 2001*]. Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, представляющую собой сумму нормализированных невязок данных и сглаженности модели. Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации τ, который задается пользователем вручную. Входными данными инверсии являются продольные и поперечные кривые $\rho_к$ и фазы импеданса по 18 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0.01 до 1600 с. Сетка аппроксимационной модели состоит из 180 ячеек по горизонтали, разреженных по краям и учащенных в окрестностях точек зондирования, и из 97 ячеек по вертикали, увеличивающихся по размерам с глубиной. При построении сетки учитывается рельеф местности. Сопротивление стартовой модели – 100 Ом·м. Пределы погрешностей инвертируемых данных следующие: модуль кажущегося сопротивления (TE мода) – 100 %, модуль кажущегося сопротивления (TM мода) – 10 %, фаза импеданса (TE мода) – 5 %, фаза импеданса (TM мода) – 5 %, типер – 0.01 %. В результате нескольких тестовых расчетов инверсии было выбрано значение параметра регуляризации τ, равное 3. В результате выполнения 200 итераций получена итоговая модель. Значение RMS-невязки составило 1.97.

Результаты профильных зондирований МТЗ, ЗСД и ЧЗ. На рисунке 10 представлена модель 2D-инверсии, построенная на основе проведенных МТЗ. В северном сегменте профиля (пункт 17) в верхней части разреза выделяется зона пониженного сопротивления, расположенная от дневной поверхности до глубины порядка 6–7 км. Эта часть профиля соответствует главному активизированному разлому, наличие которого под чехлом современных отложений предполагается по геологи-

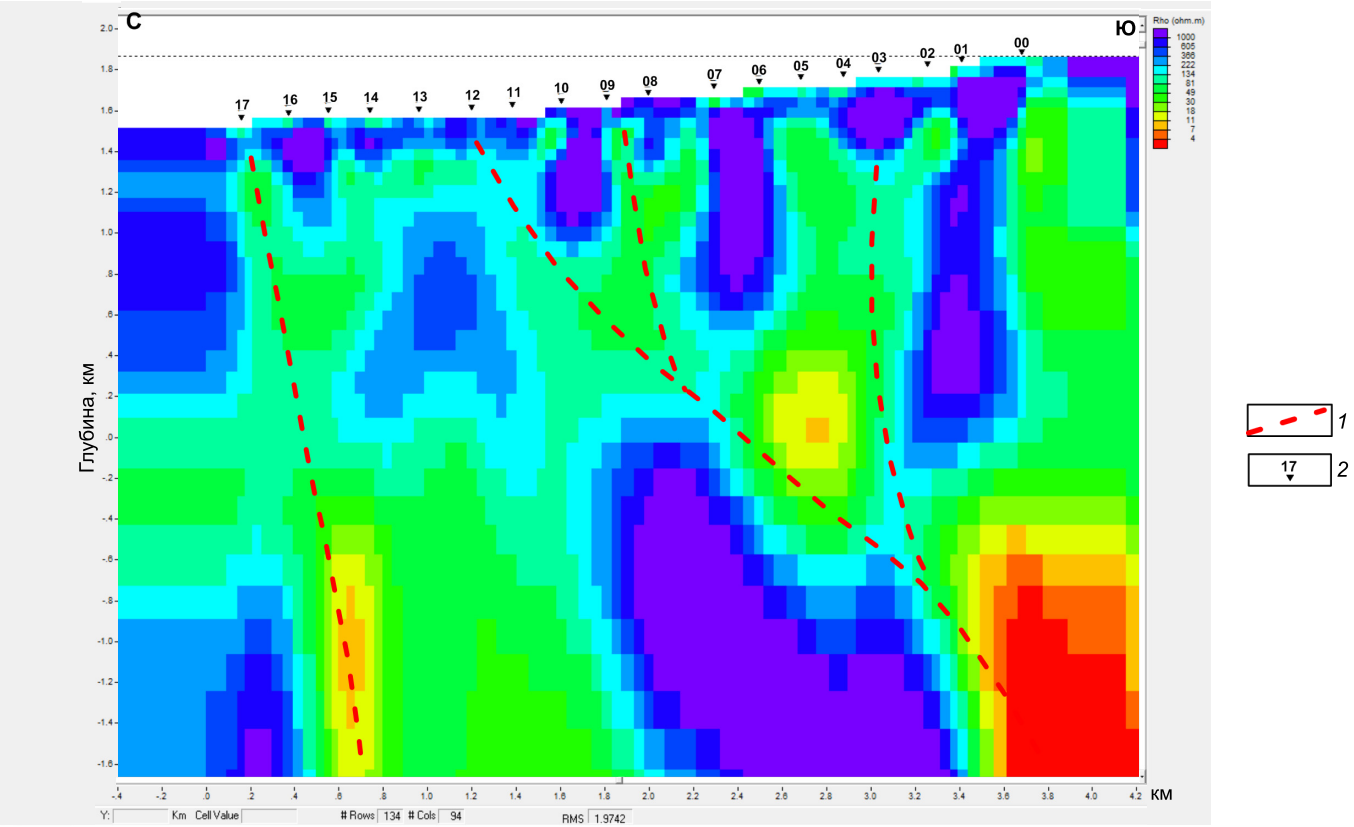

Рис. 10. Геоэлектрическая модель вдоль профиля «Кентор Западный» (мини-полигон Кентор (рис. 2). *1* – разломные структуры; *2* – пункты зондирования МТЗ.

Fig. 10. Geoelectrical model along the Kentor West profile (Kentor mini-polygon, see Fig. 2). *1* – faults; *2* – MTS sites.

ческим данным [*Przhiyalgovsky, Kuzikov, 2015*]. Аналогичный разлом находится под пунктом зондирования 12, только угол падения этого тектонического нарушения по МТ-данным более пологий. На геоэлектрическом разрезе также выявлены скрытые разломные зоны под пунктами 09 и 06, которых нет на геологической карте, что может служить дополнительной информацией о глубинном строении Байтикской впадины. Высокоомный объект, расположенный на глубинах около полутора километров от дневной поверхности под пунктами зондирования 09–02 (рис. 10), скорее всего, представляет собой выступ палеозойского фундамента. Рядом с ним находится зона повышенной трещиноватости фундамента (пункты зондирования 16–10 геоэлектрической модели), где на глубине порядка 1.5 км находится объект повышенной электропроводности.

В качестве примера интерпретации данных электромагнитного мониторинга для территории БГП приведен геоэлектрический разрез профиля Туюк (рис. 11). Особое внимание уделялось геометрии и структуре геоэлектрических неоднородностей (до глубин 10 км) зоны сочленения Чуйской впадины с Киргизским хребтом и проявлению Шамси-Тюндюкского и Каракольского разломов в геоэлектрическом разрезе.

На рисунке 12 геоэлектрические объекты, находящиеся к северу от глубинного Шамси-Тюндюкского разлома, имеют очень низкие сопротивления, вплоть до 3 Ом·м. Шамси-Тюндюкский и Каракольский разломы на дневной поверхности отделяют горную часть Киргизского хребта от предгорий и служат границей палеозойских отложений и N–Q отложений. Выявленные в геоэлектрической модели проводящие зоны, пространственно приуроченные к выходу на поверхность Шамси-Тюндюкского и Каракольского разломов, по-видимому, представляют собой механически ослабленные зоны повышенной трещиноватости, заполненные флюидом. Различия в величинах сопротивлений этих проводящих зон в рассматриваемом разрезе могут отражать различный уровень минерализации, концентрации и температуры флюида, а также различную степень связности порового пространства горных пород. Сопротивление пород палеозойского фундамента в приразломной зоне не выше 46 Ом·м, что может быть обусловлено интенсивной

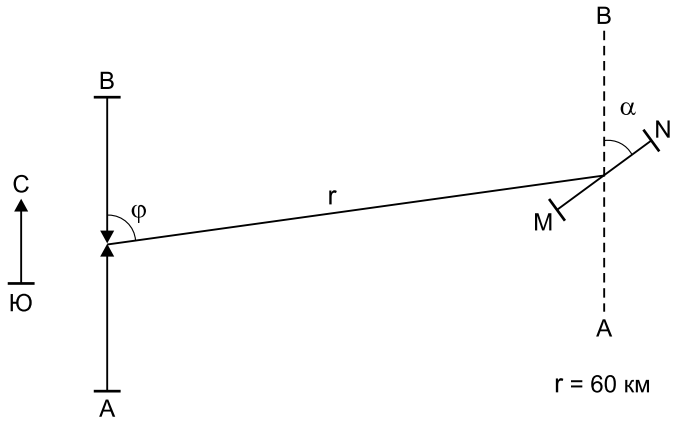

Рис. 11. Схема установки зондирования методом ЗСД в модификации «диполь-диполь». AB и MN – соответственно питающий и приемный диполи; r – расстояние между центрами диполей; φ и α – азимутальный и полярный углы.

Fig. 11. Installation diagram for sounding in the far zone, SFZ (dipole–dipole modification). AB and MN – feeder and receiver dipoles, respectively; r – distance between dipole centers; φ and α – azimuth and polar angles.

дезинтеграцией гранитоидов палеозоя [*Rybin et al., 2016a*] и наличием зоны динамического влияния разлома. Породы палеозоя, непосредственно примыкающие с юга к зоне Шамси-Тюндюкского разлома, имеют пониженные сопротивления как по результатам ЧЗ, ЗСД, так и по данным МТЗ. Это указывает на то, что горные породы в зоне разлома обладают повышенной трещиноватостью, раздроблены и заполнены флюидами. По данным МТЗ, зона Шамси-Тюндюкского разлома круто погружается на глубину до 15 км под Киргизский хребет. Каракольский разлом (рис. 12) также является частью крупной разломной зоны, ограничивающей Киргизский хребет с юга, отчетливо проявляется в геофизических полях [*Bragin, Lobanchenko, 2012*; *Pogrebnoi, Grebennikova, 2015*] и по результатам геологической съемки. Сопротивление горных пород, приуроченных к разломной зоне, составляет 10–50 Ом·м, непосредственно в зоне разлома – 3–2 Ом·м. Обращает на себя внимание слой пониженного сопротивления, расположенный на глубинах 1–5 км, что подтверждается результатами МТЗ.

Построенные геоэлектрические разрезы, выполненные различными геофизическими методами для территории БГП, позволили: 1) выявить структуру слоев и блоков с различным сопротивлением и проследить поведение разломных структур в зоне сочленения Чуйской впадины с Киргизским хребтом; 2) выделить в гранитоидах палеозоя и метаморфических породах участки повышенной электропроводности, образующие «средний» слой низкого сопротивления, который сильно трещиноват и заполнен флюидами, и определить глубину его залегания.

4. Методика мониторинговых наблюдений и обработка полученных данных ЗСД

Электромагнитный мониторинг проводится по сети, организованной на основе результатов масштабных глубинных электромагнитных зондирований. Все стационарные пункты являются базовыми, где кроме комплексных режимных наблюдений проводятся опытные работы, например эксперименты по изучению анизотропии электропроводности горных пород [*Bragin, Mukhamadeeva, 2009*]. Стационары расположены субширотно и приурочены к зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины (см. рис. 1). Максимальное удаление станций от центра питающего диполя AB составляет чуть меньше 60 км, минимальное – 9 км. Рядовые пункты ЗСД представляют собой пункты зондирования в пределах Чуйской впадины и зоны предгорий Киргизского хребта, обслуживаемые с определенной периодичностью передвижной измерительной станцией.

На каждом пункте наблюдения организованы приемные диполи (линии MN): на базовых станциях Ак-Суу, Шавай, Кегеты и рядовых пунктах ЗСД (за исключением двух из них) приемные диполи ориентированы субмеридионально, и на них измеряется лишь одна компонента электрического поля Ex. На трех стационарных пунктах (Чон-Курчак, Таш-Башат, Иссык-Ата) имеются еще и субширотно ориентированные линии MN, что позволяет вести наблюдения за двумя компонентами электрического поля Ex и Ey. Два рядовых пункта – Алмаз и База – имеют четыре приемных диполя, расположенных веером, через 45°; эти измерения необходимы для изучения анизотропии электропроводности геологической среды. Сбор информации осуществляется ежедневно, исключая выходные и праздничные дни, по шесть сеансов в день, синхронно с работой токовой станции: с 8^{00} до 14^{15}, в течение 15 мин с начала каждого часа. Запись данных происходит одновременно на всех стационарных пунктах по всем диполям, в итоге получается 60 сеансов записи (по десяти линиям MN, расположенным на шести стационарах). Вся полученная за рабочую неделю информация (300 сеансов) сбрасывается на флэш-карту.

На рядовых пунктах измерения проводятся по определенному графику, один раз в неделю. Наблюдения ведутся синхронно с работой токовой станции, полученная информация копируется на флэш-карту и доставляется в центр обработки на

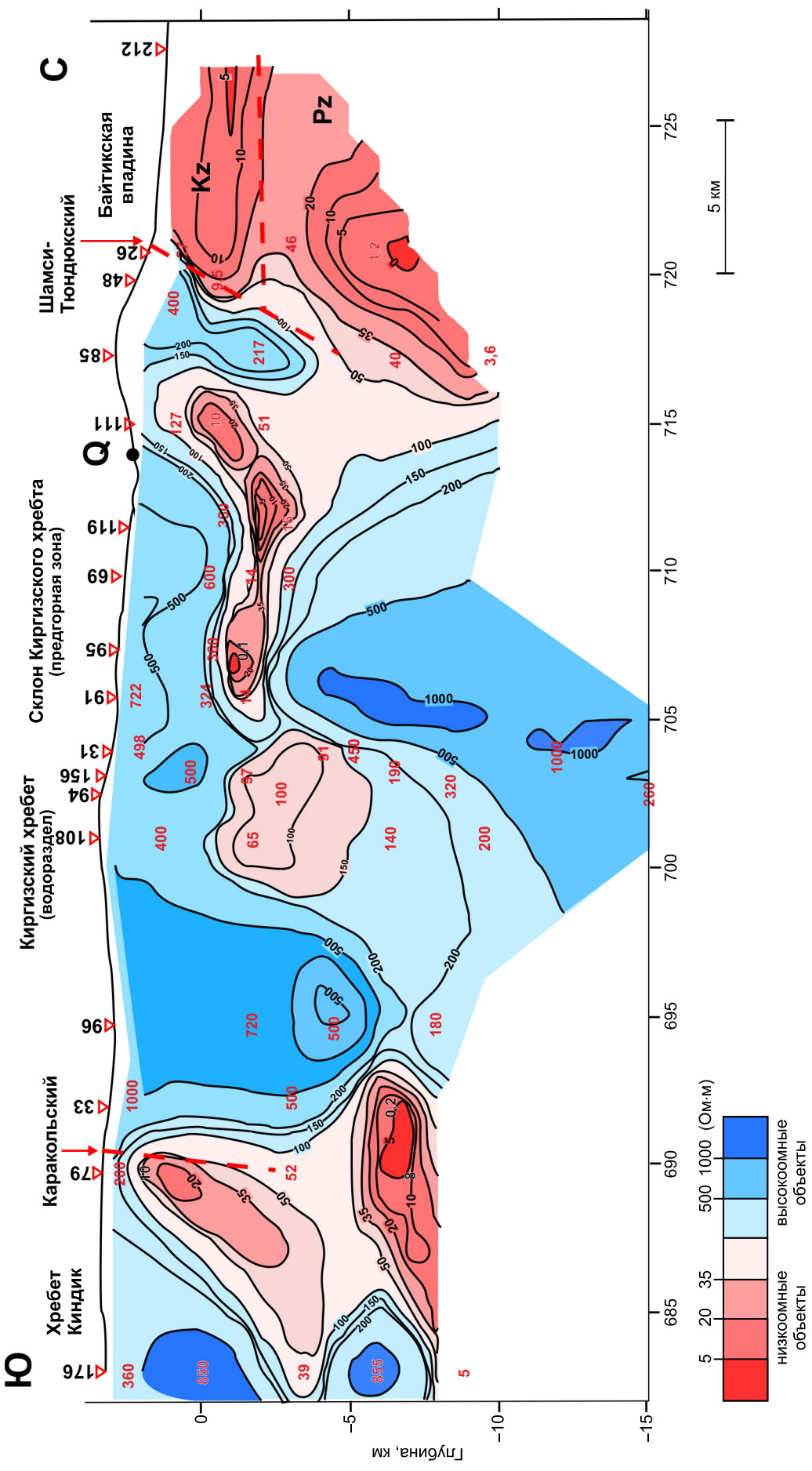

Рис. 12. Геоэлектрический разрез вдоль профиля Туюк (по данным электромагнитных зондирований ЧЗ и ЗСД, в том числе режимных) (см. рис. 4). По оси х нанесены три значимых цифры прямоугольных координат по широте (для карты К-43-А, масштаб 1:500000).

Fig. 12. Geoelectrical section along the Tuyuk profile (based on the electromagnetic soundings data, FS and SFZ, including the routine sounding data) (see Fig. 4). Three digits of rectangular coordinates along the latitude are plotted along the x-axis (for the K-43-A map, scale 1: 500000).

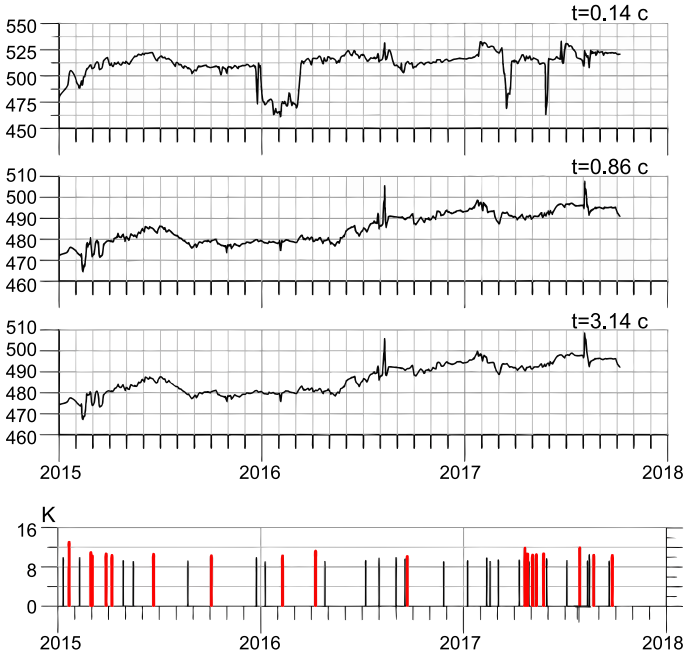

Рис. 13. Графики изменения удельного электросопротивления (по данным ЗСД) в трех горизонтах земной коры на стационарных станциях Ак-Суу, Чон-Курчак за период с 2013 г. по сентябрь 2015 г. и распределение эпицентров землетрясений с К>10 в пределах территории: 40–44° с.ш. и 72–78° в.д. в период с 14.11.2014 г. по 30.09.2015 г.

Fig. 13. Changes in the specific electrical resistivity (based on the SFZ data) for the three horizons of the crust at the Ak–Suu and Chon-Kurchak stations from 2013 to September 2015, and the distribution of K>10 earthquake epicenters in the territory (40–44° N, 72–78° E) from 14.11.2014 to 30.09.2015.

Научную станцию. Наблюдения методом ЗСД проводятся в режиме «включения», т.е. пуск зондирующего импульса и регистрация отклика на приемных станциях осуществляется одновременно. Синхронность наблюдений обеспечивается по часам GPS-приемников, установленных на токовой и приемной станциях.

Для возбуждения электромагнитного поля в земной коре применяется электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2, в которой переменный ток промышленной сети преобразуется в постоянный импульсный разнополярный с требуемыми временными параметрами. Зондирующий импульс, представляющий собой периодическую последовательность знакопеременных прямоугольных импульсов тока амплитудой 600 А и длительностью одного импульса 5 с, подается в питающий диполь АВ, расположенный в центральной части полигона и ориентированный в субмеридиональном направлении. Формирование импульсов тактовой синхронизации внешнего запуска ЭРГУ-600 обеспечивает входящая в состав ЭРГУ токовая станция ТИС-3, как и контроль, и измерение параметров, вырабатываемых ЭРГУ токовых импульсов (разработка НС РАН) [*Bragin, 2001*]. Для регистрации и обработки данных станцией ТИС-3 используется программное обеспечение, разработанное специалистами НС РАН. Результаты в виде значений тока и напряжения в электрическом диполе и вычисленных стандартов для обоих параметров передаются в центр обработки и после проверки заносятся в базу данных ЗСД [*Bragin, 2001; Digital-Measuring Station..., 2007; Current-Measuring Station..., 2011*].

Прием сигналов осуществляется на линиях MN (рис. 12), длина которых выбирается в зависимости от степени удаленности от питающего диполя (АВ) и условий приема сигнала и составляет от 50 до 1000 м. Регистрация и цифровая обработка компонент электрического поля, наблюдаемого на поверхности Земли, производятся с помощью цифровой измерительной станции ИС-2 (сама станция и программное обеспечение к ней разработаны специалистами НС РАН). Вся первичная и прошедшая обработку информация от токовых и измерительных станций вносится в базу данных ЗСД. На основе обработанных данных ЗСД строятся вариационные ряды кажущегося электрического сопротивления ρ_τ для пяти наиболее характерных времен становления поля, отражающих ситуацию по изменению ρ_τ по всему разрезу на каждом пункте ЗСД.

5. Результаты электромагнитного мониторинга ЗСД

Результаты сопоставления электромагнитных наблюдений с временем регистрации сейсмических событий, их энергетическим классом К, эпицентральным расстоянием и азимутом представлены на рисунке 13.

Анализ рассмотренных данных приводит к выводу о том, что вариации кажущегося сопротивления взаимосвязаны с сейсмическими событиями и имеют ряд особенностей:

– выделяемые на временных рядах аномальные изменения электросопротивления имеют различную продолжительность; амплитуда аномалий изменяется в широких пределах и не всегда пропорциональна силе землетрясения и расстоянию до его эпицентра;

– наблюдаемые вариации электросопротивления, связанные с одним и тем же сейсмическим событием, на разных пунктах режимных наблюдений могут быть как положительными, так и отрицательными;

– определенное значение при формировании аномалий на пунктах наблюдений имеет близость по времени (или даже полное совпадение) даты проведения электромагнитных измерений и самого сейсмического события;

– большое количество слабых землетрясений с К=6–8, регистрируемых на территории БГП, затрудняет анализ аномалий, так как во временных рядах всегда присутствуют незначительные вариации этого параметра. Однако во временных рядах наблюдаются случаи и отсутствия корреляции с сейсмическими событиями.

На основе анализа опыта многолетних наблюдений за вариациями кажущегося электрического сопротивления методом ЗСД, начатого в середине 1987 г. и продолжающегося по настоящее время, можно констатировать следующее:

1. Существует принципиальная возможность (при наличии достаточного количества измерительных станций, обслуживающих их бригад и соответствующего финансирования) проведения режимных наблюдений как по всей исследуемой площади, так и по разрезу земной коры, включая интервалы локализации гипоцентров землетрясений.

2. Кажущееся электрическое сопротивление является весьма чувствительным электрическим параметром, отражающим изменения, происходящие в земной коре, связанные в том числе и с подготовкой сейсмических событий.

3. Изучение пространственно-временного распределения вариаций $\rho_к$ указывает на то, что напряженно-деформационные процессы в глубинных горизонтах коры протекают наиболее интенсивно и, следовательно, источник, возбуждающий эти процессы, необходимо искать в нижних горизонтах земной коры [*Report…, 2007, p. 31*].

4. Аномальные изменения проводимости разреза сопровождают процессы активизации напряженно-деформационного состояния среды и могут быть необходимым, но недостаточным признаком будущего сейсмического события. Возможно, это связано с соотношением скорости деформационного процесса и инерции геологической среды [*Research Report…, 2013*].

6. Методика мониторинговых наблюдений и обработка полученных данных МТЗ

Магнитотеллурические зондирования на стационарных пунктах выполняются в диапазоне периодов 0.001–1800 с аппаратурой MTU-5 компании Phoenix Geophysics (Канада) с применением новейшей технологии. Для регистрации электрических компонент МТ-поля используется крестообразная установка с длиной приемных линий 50 м. Время регистрации составляет 24 часа, но для обработки используется только 16-часовая запись (остальные восемь часов суточной реализации не рассматриваются из-за влияния на регистрируемое МТ-поле искусственных электромагнитных импульсов, генерируемых мощной электроимпульсной установкой ЭРГУ-600). Синхронизация записей на стационарах осуществляется с помощью GPS-часов, что позволяет использовать обработку данных в формате remote reference. Для обработки МТ-данных используется программное обеспечение Phoenix Geophysics – SSMT2000, в результате чего получаются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса, зависящие не только от значений электропроводности, но и от степени неоднородности электромагнитных параметров среды и электромагнитного поля. По этой причине анализ искажений кривых зондирования на практике намного сложнее, чем в теории [*Berdichevsky et al., 1997, 2009*]. В связи с этим необходим анализ соотношений между распределениями компонент электромагнитного поля на поверхности исследуемого объема среды – обработка сихронных данных [*Goubau et al., 1978*].

7. Результаты магнитотеллурического мониторинга

В качестве примера приведены частотно-временные ряды МТ-мониторинга за 2007 и 2016 гг. для стационаров Ак-Суу и Чон-Курчак, где выделены аномалии электромагнитных параметров, соответствующих модели перераспределения флюида в порово-трещинном пространстве [*Bogomolov et al., 2007*], т.е. происходит синфазное уменьшение и увеличение значений параметра на ортогональных азимутах (рис. 14, 15).

Особое внимание обращает на себя изменение электромагнитных параметров на определенных глубинах, соответствующих наиболее чувствительным слоям (с повышенной трещиноватостью и заполненных флюидами), – 1–5 км и 8–12 км (рис. 14–16). Частотно-временные ряды (ЧВР) вариаций фаз импеданса менее информативны по сравнению с другими электромагнитными параметрами, что может быть связано с существованием не только механизма перераспределения флюидов в системе трещин, но и «емкостной» модели.

При этом для стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу наиболее характерно изменение $\rho_к$ верхней части разреза, что практически отсутствует на ЧВР стационара Чон-Курчак. Таким образом, можно сделать вывод о различиях в протекании

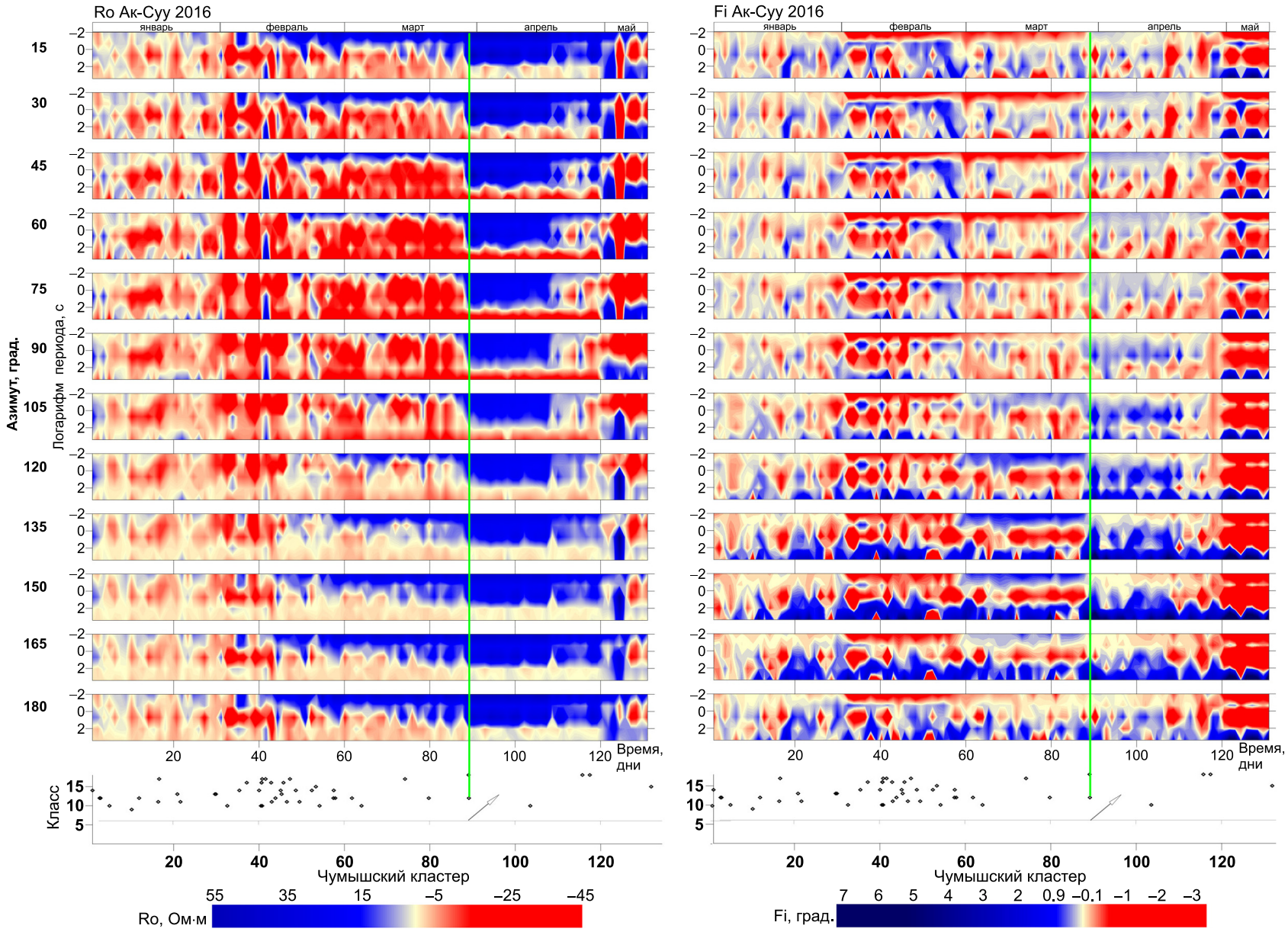

Рис. 14. Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга (вариации кажущегося сопротивления и фазы) для станции Ак-Суу в сопоставлении с сейсмичностью Чумышского кластера за январь – май 2016 г. (ромбы – сейсмические события).

Fig. 14. Frequency time series of the azimuth MT-monitoring (variations of apparent resistivity and phase) at the Ak-Suu station in comparison with seismicity of the Chumysh cluster in January – May 2016 (diamonds – seismic events).

Geodynamics & Tectonophysics 2018 Volume 9 Issue 2 Pages 461–487

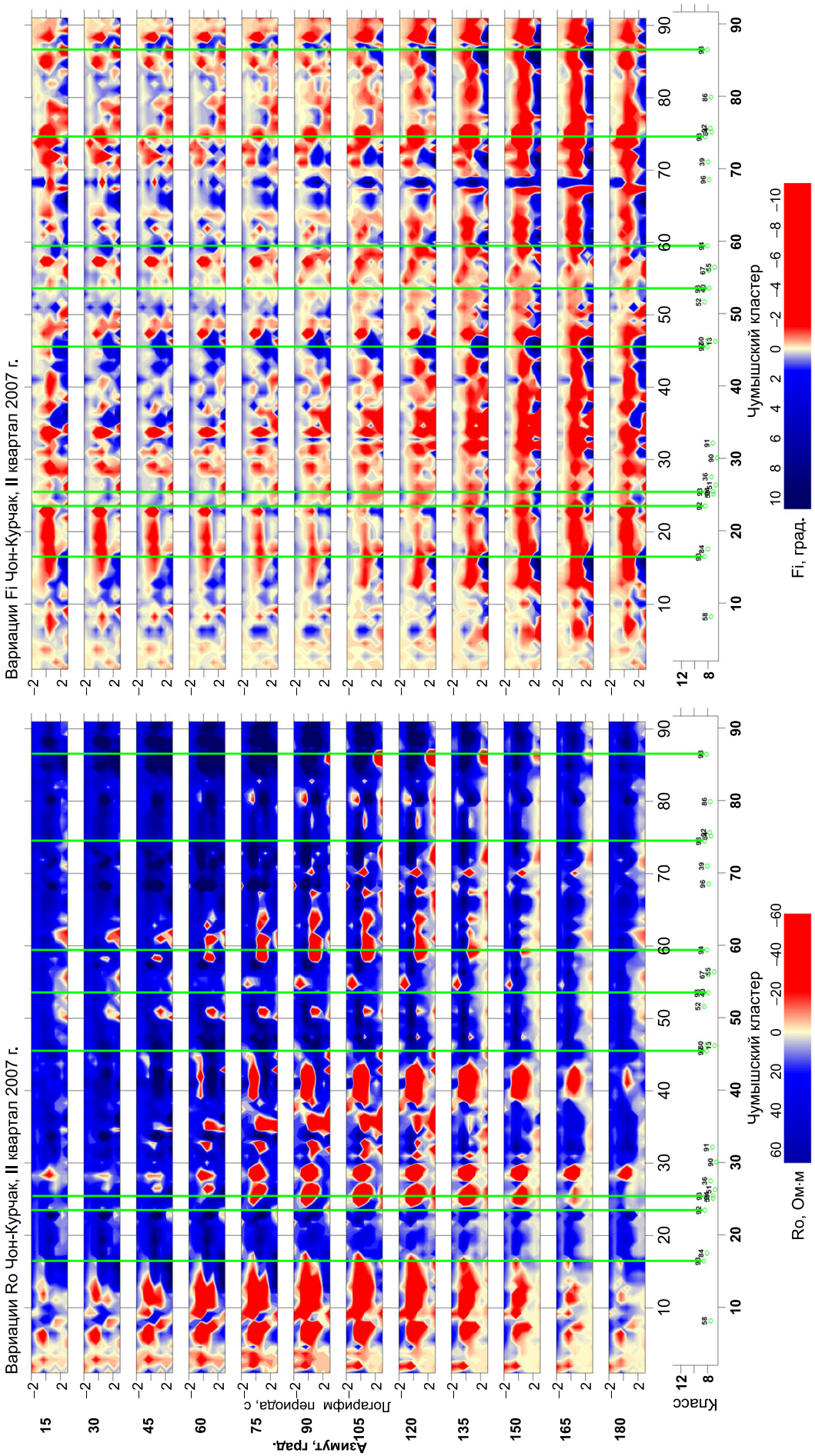

Рис. 15. Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга (вариации кажущегося сопротивления и фазы) для станции Чонкурчак в сопоставлении с сейсмичностью Чумышского кластера за апрель – июнь 2007 г. (ромбы – сейсмические события).

Fig. 15. Frequency–time series of the azimuth MT-monitoring (variations of apparent resistivity and phase) at the Chonkurchak station in comparison with seismicity of the Chumysh cluster in April – June 2007 (diamonds – seismic events).

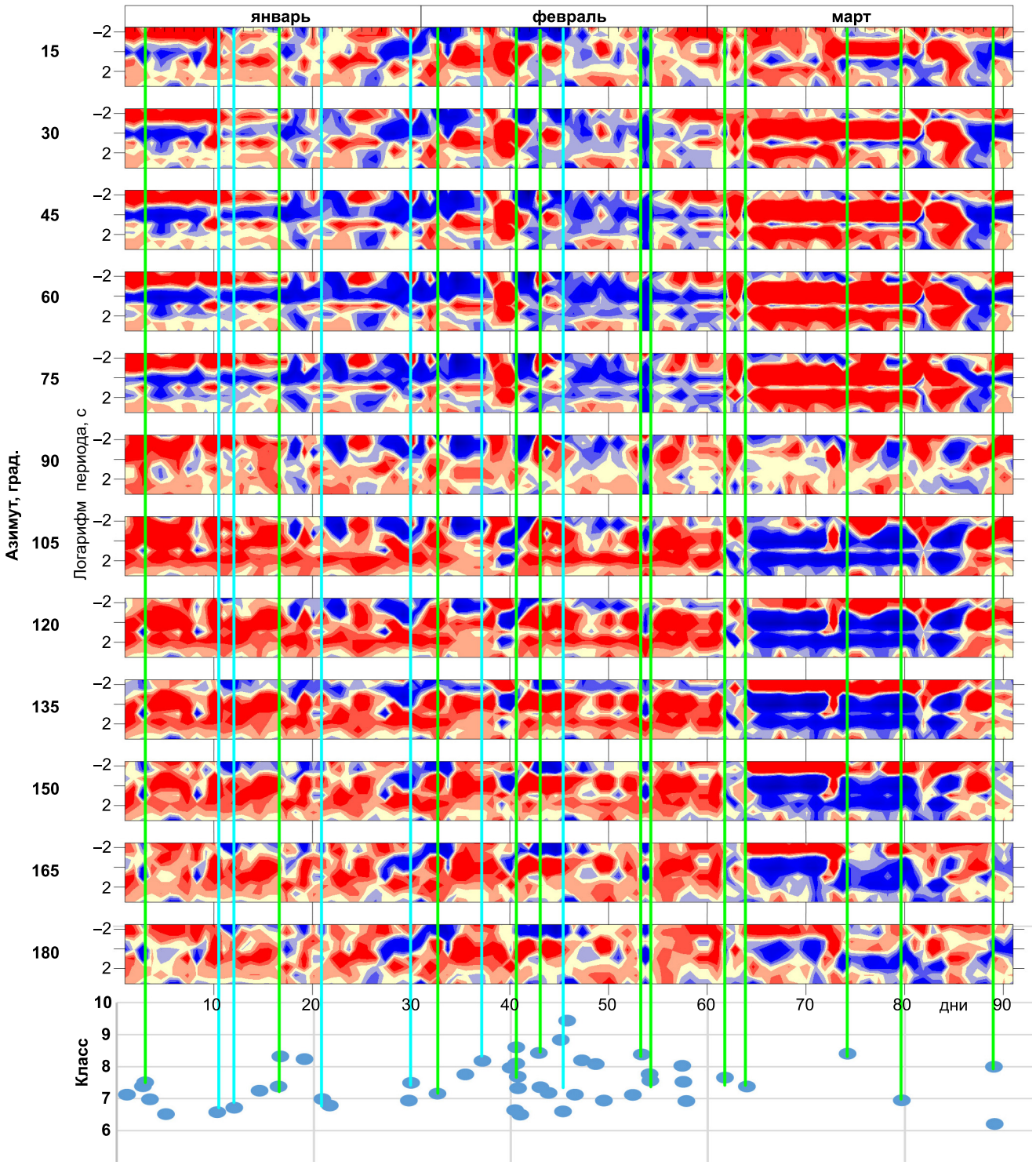

Рис. 16. Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга (вариации типпера) для станции Ак-Суу в сопоставлении с сейсмичностью Чумышского кластера за январь – март 2016 г. (овалы – сейсмические события).

Fig. 16. Frequency–time series of the azimuth MT-monitoring (variations of magnetic tipper component) at the Ak-Suu station in comparison with seismicity of the Chumysh cluster in January – March 2016 (ovals – seismic events).

напряженно-деформационных процессов в разных горизонтах земной коры (см. рис. 14, 15). Обращает на себя внимание приуроченность сейсмических событий к градиентным зонам изменения вариаций кажущегося сопротивления.

При проведении МТ-мониторинга на территории БГП также анализируются частотно-временные ряды модулей реальных и мнимых типперов (рис. 16). По-видимому, на поведение типпера могут влиять локальные геоэлектрические неодно-

родности верхней части земной коры, вызывающие гальванические аномалии электрического поля, такими неоднородностями могут оказаться разломные структуры. При геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения, возможно изменение степени обводненности и минерализации вод в зоне разлома, что может отражаться в вариациях типпера.

8. Заключение

В результате исследований, выполненных комплексом электромагнитных методов на Бишкекском геодинамическом полигоне, получены новые сведения о глубинном строении и пространственном распределении геоэлектрических характеристик среды, выявлены закономерности размещения геоэлектрических аномалий и их корреляция со структурными особенностями разреза и сейсмическими событиями.

Методом МТЗ определено детальное глубинное геоэлектрическое строение земной коры Байтикской впадины мини-полигона Кентор. Построена геоэлектрическая модель по профилю «Кентор Западный». Определены геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученном геоэлектрическом разрезе. Не противореча в целом результатам геологической сьемки, выполненной на территории мини-полигона Кентор [*Przhiyalgovsky, Kuzikov, 2015*], построенный разрез демонстрирует важные новые черты глубинной структуры земной коры. Выявлены скрытые разломные зоны, которые не обозначены на геологической карте, что может служить дополнительной информацией о глубинном строении Байтикской впадины. На геоэлектрическом разрезе четко прослеживается зона динамического разлома (ширина), положение разломной зоны (глубина залегания и наклон), верхняя кромка разломной структуры. Шамси-Тюндюкский и Каракольский разломы на дневной поверхности отделяют горную часть Киргизского хребта от предгорий и служат границей палеозойских отложений и N-Q отложений. Выявленные в геоэлектрической модели проводящие зоны, пространственно приуроченные к выходу на поверхность Шамси-Тюндюкского и Каракольского разломов, по-видимому, представляют собой механически ослабленные зоны повышенной трещиноватости, заполненные флюидом. Различия в величинах сопротивлений этих проводящих зон в рассматриваемом разрезе могут отражать различный уровень минерализации, концентрации и температуры флюида, а также различную степень связности порового пространства горных пород. Сопротивление в зоне разломных нарушений в верхней части разреза (по данным МТЗ) оценивается в 30–10 Ом·м, на глубинах около 2 км – в 1.0–0.5 Ом·м. Предварительно эти параметры были оценены (результаты ВЭЗ, ЧЗ и ЗС) как 46–10 Ом·м и 5.0–1.2 Ом·м соответственно. Основной результат детализационных исследований в верхней и средней коре зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта – уточнение параметров геоэлектрических разрезов, построенных по данным электромагнитных методов (ВЭЗ, ЧЗ и ЗС).

Проведенные электромагнитные исследования выявили различия в протекании напряженно-деформационных процессов в разных горизонтах земной коры. Обосновано комплексное использование двух электроразведочных методов – ЗСД и МТЗ, которые имеют различную глубинность и разрешающую способность: по данным ЗС получены наиболее детальные геоэлектрические параметры верхней части разреза в среднем до 7 км, а по данным МТЗ – геоэлектрические характеристики до глубин ~15–20 км; выявлены наиболее чувствительные к изменениям кажущегося сопротивления диапазоны глубин для Чуйской впадины – 1–5 км и 8–12 км.

Именно к этим интервалам глубин приурочены синфазные изменения электромагнитных параметров на ортогональных азимутах, и наиболее ярко проявляется взаимосвязь изменений электромагнитных параметров с сейсмическими событиями. Синфазные изменения кажущегося сопротивления и фазы импеданса происходят в разных частотных диапазонах – как правило, вариации сопротивления приурочены к верхней части разреза, фазы – к нижней.

База данных электромагнитного мониторинга ЗСД включает в себя информацию по 40 пунктам зондирований (с 1987 по 2017 г.) и представлена 54 временными рядами (по общему количеству установленных на пунктах приемных диполей) $\rho_к$ для пяти наиболее характерных времен становления поля. Данные МТ-мониторинга представлены в виде ЧВР электромагнитных параметров (2003–2017 гг.), как и результаты профильного МТ-мониторинга, выполненного на территории мини-полигона Кентор за период 2012–2017 гг.

Представленные данные наглядно показывают, что электропроводность среды можно рассматривать в качестве индикатора геодинамических процессов, которые сопровождают подготовку и реализацию сейсмических событий.

9. Благодарности

Авторы выражают признательность анонимным рецензентам за ценные комментарии и замечания,

которые помогли улучшить рукопись, благодарят к.ф.-м.н. В.Д. Брагина за конструктивное обсуждение результатов электромагнитного мониторинга. Представленная статья выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00654а). Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания Научной станции РАН (тема IX.128. 01552018-0001; IX.136. 01552018-0003).

10. Литература / References

Abdrakhmatov K.E., Thompson S., Wildon R., 2007. Active Tectonics of the Tien Shan. Ilim, Bishkek, 70 p. (in Russian) [*Абдрахматов К.Е., Томпсон С., Уилдон Р.* Активная тектоника Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 2007. 70 с.].

Avagimov A.A., Ataev A.K., Ataev S.A., Kuz'min Yu.O., Efendiev M.I., 1988. Relationship between anomalous changes in the electrical resistivity of rocks in fault zones and tidal deformation of the crust. *Izvestia AN TSSR* (*Bulletin of the Acad. Sci. of the Turkmen SSR*), *FTKGN series* (5), 50–52 (in Russian) [*Авагимов А.А., Атаев А.К., Атаев С.А., Кузьмин Ю.О., Эфендиев М.И.* Связь аномальных изменений электросопротивления горных пород в разломной зоне с приливными деформациями земной коры // *Известия АН ТССР, серия ФТХГН*. 1988. № 5. С. 50–52].

Barsukov O.M., Sorokin O.N., 1973. Change in the apparent resistance of rocks in the Garm seismically active region. *Fizika Zemli* (10), 100–102 (in Russian) [*Барсуков О.М., Сорокин О.Н.* Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // *Физика Земли*. 1973. № 10. С. 100–102].

Batalev V.Y., Bataleva E.A., Matyukov V.E., Rybin A.K., 2013. Deep structure of the western area of Talas-Fergana fault as a result of magnetotelluric sounding. *Litosfera* (*Lithosphere*) (4), 136–145 (in Russian) [*Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К.* Глубинное строение западной части зоны Таласо-Ферганского разлома по результатам магнитотеллурических зондирований // *Литосфера*. 2013. № 4. С. 136–145].

Batalev V.Yu., Berdichevsky M.N., Golland M.L., Golubtsova NS, Kuznetsov V.A., 1989. Interpretation of deep magnetotelluric soundings in the Chuya intermontane depression. *Fizika Zemli* (9), 42–45 (in Russian) [*Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А.* Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине // *Физика Земли*. 1989. № 9. С. 42–45].

Bataleva E.A., 2005. The Deep Structure of the Largest Fault Zones in the Western Part of the Kirghiz Tien Shan and Modern Geodynamics. Candidate of Sci. Thesis (Geology and Mineralogy). Bishkek, 200 p. (in Russian) [*Баталева Е.А.* Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части Киргизского Тянь-Шаня и современная геодинамика: Дис. … канд. геол.-мин. наук. Бишкек, 2005. 200 с.].

Bataleva E.A., 2016. Correlation dependences of electromagnetic and deformation parameters. *Doklady Earth Sciences* 468 (1), 523–526. https://doi.org/10.1134/S1028334X16050184.

Bataleva E.A., Batalev V.Y., 2015. Reflection of fault structures in electromagnetic parameters (for the Central Tien Shan). *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 15 (9), 160–164 (in Russian) [*Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Проявление разломных структур в электромагнитных параметрах (для территории Центрального Тянь-Шаня) // *Вестник Кыргызско-Российского славянского университета.* 2015. Т. 15. № 9. С. 160–164].

Bataleva E.A., Batalev V.Y., Rybin A.K., 2013. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 49 (3), 402–410. https://doi.org/10.1134/S1069351313030038.

Bataleva E.A., Buslov M.M., Rybin A.K., Batalev V.Yu., Safronov I.V., 2006a. Crustal conductor associated with the Talas-Fergana fault and deep structure of the Southwestern Tien Shan: geodynamic implications. *Geologiya i Geofizika* (*Russian Geology and Geophysics*) 47 (9), 1023–1029.

Bataleva E.A., Przhiyalgovskii E.S., Batalev V.Y., Lavrushina E.V., Leonov M.G., Matyukov V.E., Rybin A.K., 2017. New data on the deep structure of the South Kochkor zone of concentrated deformation. *Doklady Earth Sciences* 475 (2), 930–934. https://doi.org/10.1134/S1028334X1708013X.

Bataleva E.A., Rybin A.K., Batalev V.Y., 2014. Variations of rocks apparent resistivity as an indicator of stress-deformed state of the medium. *Geofizicheskiye Issledovaniya* (*Geophysical Research*) 15 (4), 53–64 (in Russian) [*Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.* Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // *Геофизические исследования*. 2014. Т. 15. № 4. С. 53–64].

Bataleva E.A., Rybin A.K., Batalev V.Yu., Shchelochkov G.G., Safronov I.V., 2006b. Experience of constructing a three–dimensional geoelectrical model for the Kurai-Chuya system of depressions in the Mountainous Altai according to electromagnetic sounding data. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* (3), 104–112 (in Russian) [*Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Щелочков Г.Г., Сафронов И.В.* Опыт построения трехмерной геоэлектрической модели района Курайско-Чуйской системы впадин Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // *Вестник Кыргызско-Российского славянского университета*. 2006. № 3. С. 104–112].

Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I., Novikov D.V., Pastutsan V.V., 1997. Analysis and Interpretation of Magnetotelluric Data. MSU Dialogue, Moscow, 161 p. (in Russian) [*Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.В., Пастуцан В.В.* Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог МГУ, 1997. 161 с.].

Berdichevsky M.N., Kuznetsov V.A., Pal'shin N.A., 2009. Analysis of magnetovariational response functions. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (3), 179–198. https://doi.org/10.1134/S106935130903001X.

Bogomolov 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. Candidate of Sci. Thesis (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., Lobanchenko A.N., 2012. Geophysical preconditions for the development of geothermal energy industry in the Tien Shan territory. In: M.G. Leonov, N.V. Sharov (Eds.), Modern problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens. To the 75th anniversary of the birth of Yu.A. Trapeznikov. Reports of the Fifth International Symposium. Moscow–Bishkek, p. 125–133 (in Russian) [*Брагин В.Д., Лобанченко А.Н.* Геофизические предпосылки для развития геотермальной энергетики на территории Тянь-Шаня // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. К 75-летию со дня рождения Ю.А. Трапезникова. Материалы докладов Пятого Международного симпозиума / Ред. М.Г. Леонов, Н.В. Шаров. Москва–Бишкек, 2012. С. 125–133].

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 geoecological problems. Issue 4. Materials of the Fourth International Symposium (June 15–20, 2008). Moscow–Bishkek, p. 74–84 (in Russian) [*Брагин В.Д., Мухамадеева В.А.* Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Вып. 4. Материалы четвертого международного симпозиума (15–20 июня 2008 г.). Москва–Бишкек, 2009. С. 74–84].

Bragin V.D., Velikhov E.P., Volikhin A.M., Zeigarnik V.A., Koshkin N.A., Trapeznikov Y.A., Tchelochkov G.G., 1990. Electromagnetic studies in the test-field at Frunze I. On the relationship between resistivity variations, deformation processes and earthquakes. *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica* 25 (3–4), 443–451.

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.

Bullen M.E., Burbank D.W., Garver J.I., 2003. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *The Journal of Geology* 111 (2), 149–165. https://doi.org/10.1086/345840.

Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.A., Batalev V.Yu., 2007. Cenozoic tectonic and geodynamic evolution of the Kyrgyz Tien Shan Mountains: A review of geological, thermochronological and geophysical data. *Journal of Asian Earth Sciences* 29 (2–3), 205–214. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.07.001.

Current-Measuring Station TIS-3, 2011. User Manual. Collection of the Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, 52 p. (in Russian) [Токовая измерительная станция ТИС-3. Инструкция по эксплуатации. Бишкек: Фонды НС РАН, 2011. 52 с.].

Digital-Measuring Station IS-2, 2007. Technical Description. Collection of the Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, p. 16–26 (in Russian) [Станция цифровая измерительная ИС-2. Техническое описание. Бишкек: Фонды НС РАН, 2007. С. 16–26].

Epov M.I., Antonov E.Y., Nevedrova N.N., Olenchenko V.V., Pospeeva E.V., Napreev D.V., Sanchaa A.M., Potapov V.V., Plotnikov A.E., 2014. Integrated electromagnetic and geochemical surveys for petroleum exploration in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 55 (5–6), 763–774. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.019.

Epov M.I., Dashevsky Yu.A., El'tsov I.N., 1990. Automated Interpretation of Electromagnetic Sounding Data (preprint). Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Novosibirsk, 29 p. (in Russian) [*Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н.* Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований (препринт). Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР, 1990. 29 с.].

Epov M.I., Eltsov I.N., 1992. Direct and Inverse Problems of Inductive Geoelectrics in One-Dimensional Media (preprint). Novosibirsk, 31 p. (in Russian) [*Эпов М.И., Ельцов И.Н.* Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах (препринт). Новосибирск, 1992. 31 с.].

Ernst T., Jankowski J., Rozłucki C., Teisseyre R., 1993. Analysis of the electromagnetic field recorded in the Friuli seismic zone, northeast Italy. *Tectonophysics* 224 (1–3), 141–148. https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90065-R.

Fox L., 2001. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System. U.S. Patent № 6 191 587 B1.

Goubau W.M., Gamble T.D., Clarke J., 1978. Magnetotelluric data analysis: removal of bias. *Geophysics* 43 (6), 1157–1162. https://doi.org/10.1190/1.1440885.

Ingerov O., 2005. Application of electrical prospecting methods for hydrocarbon prospecting. *Notes of the Mining Institute* 162, 15–25 (in Russian) [*Ингеров О.* Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов // *Записки Горного института*. 2005. Т. 162. С. 15–25].

*Jones A.G., Jones A.G., Chave A.D., Egbert G., Auld D., Bahr K.*A., 1989. A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 94 (B10), 14201–14213. https://doi.org/10.1029/JB094iB10p14201.

Laverov N.P., Makarov V.I. (Eds.), 2005. Recent Geodynamics of Intracontinental Areas of Collision Mountain Building (Central Asia). Nauchnyy 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.].

Losikhin L.N., Matyukov E.K., Paznikov V.A. et al., 2013. Non-Polarizable Electrode for Ground Geophysical Electrical Prospecting. Patent for utility model RU 123979 U1, published on 10.01.2013 (in Russian) [*Лосихин Л.Н., Матюков Е.К., Пазников В.А. и др.* Неполяризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки. Патент на полезную модель RU 123979 U1, опубликовано 10.01.2013 г.].

Lu J., Qian F., Zhao Y., 1999. Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan China. *Tectonophysics* 307 (3–4), 397–405. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00101-8.

Makarov V.I., Alekseev D.V., Leonov M.G., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Bragin V.D., Rybin A.K., Shchelochkov G.G., Belyaev I.V., Dergunov N.T., Efimova N.N., Roslov Y.V., Munirova L.M., Pavlenkin A.D., Roecker S., 2010. Underthrusting of Tarim beneath the Tien Shan and deep structure of their junction zone: main results of seismic experiment along MANAS Profile Kashgar-Song-Köl. *Geotectonics* 44 (2), 102–126. https://doi.org/10.1134/S0016852110020020.

Melnikova T.A., 1991. Maps of the total longitudinal conductivity of the Meso-Cenozoic deposits of the intermountain depressions in Kyrgyzstan. In: F.N. Yudakhin (Ed.), The lithosphere structure of the Tien Shan. Ilim, Bishkek, p. 100–111 (in Russian) [*Мельникова Т.А.* Карты суммарной продольной проводимости мезо-кайнозойских отложений межгорных впадин Киргизии // Строение литосферы Тянь-Шаня / Ред. Ф.Н. Юдахин. Бишкек: Илим, 1991. С. 100–111].

Mikolaichuk A.V., Sobel E., Gubrenko M.V., Lobanchenko A.N., 2003. Structural evolution of the northern margin of the Tien Shan orogen. *Izvestia of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic* (4), 50–58 (in Russian) [*Миколайчук А.В., Собел Э., Губренко М.В., Лобанченко А.Н.* Структурная эволюция северной окраины Тяньшаньского орогена // *Известия НАН КР*. 2003. № 4. С. 50–58].

Moroz Yu.F., Moroz T.A., Mandelbaum M.M., 2006. Search for anomalous effects in geophysical fields in relation to earthquakes in the Baikal rift zone. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (5), 434–447. https://doi.org/10.1134/S1069351306050077.

Moroz Yu.F., Moroz T.A., Mogi T., 2007. Methods and results of monitoring of the natural telluric field in the Baikal rift zone. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 43 (11), 938–950. https://doi.org/10.1134/S1069351307110043.

Nevedrova N.N., Epov M.I., 2012. Electromagnetic monitoring in seismically active regions of Siberia. *Geophysical Journal* 34 (4), 209–223 (in Russian) [*Неведрова Н.Н., Эпов М.И.* Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34. № 4. С. 209–223].

Novikov I.S., Emanov A.A., Leskova E.V., Batalev V.Yu., Rybin A.K., Bataleva E.A., 2008. The system of neotectonic faults in southeastern Altai: orientations and geometry of motion. *Russian Geology and Geophysics* 49 (11), 859–867. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.04.005.

Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F., 1993. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: a review of observation and mechanisms. *Reviews of Geophysics* 31 (2), 117–143. https://doi.org/10.1029/93RG00820.

Pogrebnoi V.N., Grebennikova V.V., 2015. Features of geophysical fields in the junction zone of the Chuya depression and its mountain frame. In: Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogenes. Proceedings of the Fifth International Symposium (23–29 June 2014, Bishkek). Moscow – Bishkek, p. 95–100 (in Russian) [*Погребной В.Н., Гребенникова В.В.* Особенности геофизических полей в зоне сочленения Чуйской впадины и ее горного обрамления // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы Пятого международного симпозиума (23–29 июня 2014 г., г. Бишкек). Москва – Бишкек, 2015. С. 95–100].

Przhiyalgovsky E.S., Kuzikov S.I., 2015. Detailed morphostructural studies in the Bishkek geodynamic test area. In: Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens. Proceedings of the 6th International Symposium. Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, p. 11–17 (in Russian) [*Пржиялговский Е.С., Кузиков С.И.* Детальные морфоструктурные исследования в районе Бишкекского геодинамического полигона // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докладов 6-го Международного симпозиума. Бишкек: НС РАН, 2015. С. 11–17].

*Report on the Implementation of Works under Programme 5 Earth Sciences RAS "*Deep Earth Structure, Geodynamics, Magmatism, and the Interaction of Geospheres", 2007. Direction 6: Contemporary and recent geodynamics and crustal movements from the complex of geological and geophysical methods. Moscow – Bishkek, p. 31–41, p. 41–57 (in Russian) [Отчет о выполнении работ по Программе 5 ОНЗ РАН «Глубинное строение Земли, геодинамика, магматизм, взаимодействие геосфер». Направление 6: Современная и новейшая геодинамика и движение земной коры по комплексу геолого-геофизических методов. Москва – Бишкек, 2007. С. 31–41, С. 41–57].

Report on the results of experimental–methodological prognostic observations in seismogenic zones of Central Asia in 1991–1994, 1994. Collection of the Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, p. 155–166 (in Russian) [Отчет о результатах проведения опытно-методических прогностических наблюдений в пределах сейсмогенных зон Средней Азии в 1991–1994 гг. Бишкек: Фонды НС РАН, 1994. С. 155–166].

Research Report "Study of geodynamic, seismic and geophysical processes as the basis for earthquake forecasting (including modeling of inelastic processes in seismogenerating zones", 2013. Scientific Direction 78. Collection of the Research Station of the Russian Academy of Sciences, p. 66 (in Russian) [Отчет о научно-исследовательской работе «Изучение геодинамических, сейсмических и геофизических процессов как основы прогноза земле-

трясений (включая моделирование неупругих процессов в сейсмогенерирующих зонах». Научное направление 78. Бишкек: Фонды НС РАН, 2013. С. 66].

Rodi W.L., Mackie R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics* 66 (1), 174–187.

Rybin A.K., 2011. Deep Structure and Recent Geodynamics of the Central Tien Shan from the Results of Magnitotelluric Studies. Nauchnyi Mir, Moscow, 232 p. (in Russian) [*Рыбин А.К.* Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М.: Научный мир, 2011. 232 с.].

Rybin A.K., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Bragin V.D., Schelochkov G.G., Leonov M.G., Przhiyalgovskii E.S., Morozov Y.A., 2016a. Nature of electric conductive layers of the upper crust and infrastructure of the granites of the central Tien Shan. *Doklady Earth Sciences* 470 (1), 968–971. https://doi.org/10.1134/S1028334X16090142.

Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Makarov V.I., Safronov I.V., 2005. Structure of the Earth crust by magnitotelluric soundings. In: N.P. Laverov, V.I. Makarov (Eds.), Recent Geodynamics of Intracontinental Areas of Collision Mountain Building (Central Asia). Nauchny Mir, Moscow, p. 79–96 (in Russian) [*Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Макаров В.И., Сафронов И.В.* Структура земной коры по данным магнитотеллурических зондирований // Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. Н.П. Лаверов, В.И. Макаров. М.: Научный мир, 2005. С. 79–96].

Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Matyukov V.E., 2011. Variations in electrical resistance of the crust according to the results of magnetotelluric monitoring of seismically active zones of the Tien Shan. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 11 (4), 29–40 (in Russian) [*Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е.* Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // *Вестник Кыргызско-Российского славянского университета*. 2011. Т. 11. № 4. С. 29–40].

Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Matyukov V.E., Spichak V.V., 2008. Array magnetotelluric soundings in the active seismic area of Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics* 49 (5), 337–349. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.014.

Rybin A.K., Bataleva E.A., Leonov M.G., Przhiyalgovsky E.S., Kozhogulov K.Ch., Nikol'skaya O.V., Mamyrov E.M., 2016b. Modern geodynamic activity of the crust in the Northern Tien Shan and hazardous geological processes. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 16 (3), 157–163 (in Russian) [*Рыбин А.К., Баталева Е.А., Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Кожогулов К.Ч., Никольская О.В., Мамыров Э.М.* Современная геодинамическая активность земной коры Северного Тянь-Шаня и опасные геологические процессы // *Вестник Кыргызско-Российского славянского университета*. 2016. Т. 16. № 3. С. 157–163].

Safonov A.S., Bubnov V.P., 1979. Increasing the accuracy of MT reconnaissance. *Applied Geophysics* 96, 136–142 (in Russian) [*Сафонов А.С., Бубнов В.П.* Повышение точности МТ разведки // *Прикладная геофизика*. 1979. № 96. С. 136–142].

Safronov I.V., Rybin A.K., Spichak V.V., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., 2006. New geophysical data on the deep structure of the junction zone of the Kirghiz ridge and the Chuya basin. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* (3), 95–103 (in Russian) [*Сафронов И.В., Рыбин А.К, Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А.* Новые геофизические данные о глубинном строении зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2006. № 3. С. 95–103].

Safronov I.V., Zeygarnik V.A., Shchelochkov G.G., Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Fox L., Ingerov A., Feldman I.S., 2004. Some aspects of continuous magnetotelluric observations in the North Tien Shan seismogenerating zone. In: Physical, geophysical and geodynamical studies in Central Asia at the beginning of the 21st century. KRSU, Bishkek, p. 16–21 (in Russian) [*Сафронов И.В., Зейгарник В.А., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Fox L., Ingerov A., Фельдман И.С.* Некоторые аспекты непрерывных магнитотеллурических наблюдений в Северо-Тяньшаньской сейсмогенерирующей зоне // Физические, геофизические и геодинамические исследования в Центральной Азии в начале XXI века. Бишкек: КРСУ, 2004. С. 16–21].

Stanica D., Stanica M., 2007. Electromagnetic monitoring in geodynamic active areas. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 4 (1), 99–107.

Thompson S.C., Weldon R.J., Rubin C.M., Abdrakhmatov K., Molnar P., Berger G.W., 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B9), 2203. https://doi.org/10.1029/2001JB000596.

Velikhov E.P., Zeygarnik V.A. (Eds.), 1993. Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields. Nauka, Moscow, 158 p. (in Russian) [Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / Ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М.: Наука, 1993. 158 с.].

Yakovlev I.A., 1991. Processing and Interpretation of AS-MTS Data in Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields. Exploration Geophysics. VIEMS, Moscow, 55 p. (in Russian) [*Яковлев И.А.* Обработка и интерпретация материалов ЗС-МТЗ при поисках и разведке месторождений нефти и газа. Разведочная геофизика. М.: ВИЭМС, 1991. 55 с.].

Zhdanov M.S., 1986. Electrical Prospecting. Nedra, Moscow, 386 p. (in Russian) [*Жданов М.С.* Электроразведка. М.: Недра, 1986. 386 с.].

Zhdanov M.S., 2007. The Theory of Inverse Problems and Regularization in Geophysics. Nauchny Mir, Moscow, 710 p. (in Russian) [*Жданов М.С.* Теория обратных задач и регуляризации в геофизике М.: Научный мир, 2007. 710 с.].

Елена Анатольевна Баталева, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Научная станция РАН в г. Бишкеке
720049, Бишкек-49, Научная станция РАН, Кыргызстан
e-mail: bataleva@gdirc.ru

Elena A. Bataleva, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Research Station of RAS in Bishkek City
Research Station of RAS, Bishkek 720000, Kyrgyzstan
e-mail: bataleva@gdirc.ru

Винера Аскаровна Мухамадеева, н.с.
Научная станция РАН в г. Бишкеке
720049, Бишкек-49, Научная станция РАН, Кыргызстан
e-mail: vinera@gdirc.ru

Vinera A. Mukhamadeeva, Researcher
Research Station of RAS in Bishkek City
Research Station of RAS, Bishkek 720000, Kyrgyzstan
e-mail: vinera@gdirc.ru