

ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Елена Анатольевна Баталева

Научная станция РАН, 720049, Кыргызстан, г. Бишкек, к.г.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований, тел. 996(312)316-140, e-mail: bataleva@gdirc.ru

В работе представлены результаты анализа данных магнитотеллурических зондирований, выполненных в 2003-2020 годах. Показано сравнение геоэлектрических моделей для Чуйской и Кочкорской впадин Северного Тянь-Шаня. Основная задача исследования заключается в выявлении закономерностей распределения геоэлектрических неоднородностей глубинного строения Бишкекского геодинамического полигона. Особое внимание в геоэлектрических моделях уделялось изучению ключевых объектов переходных зон от горных хребтов к межгорным впадинам. Рассмотрена природа коровых аномалий электропроводности.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, глубинное строение, зона динамического влияния разлома, аномалия электропроводности

STUDY OF THE DEPTH STRUCTURE OF SEISMICALLY ACTIVE ZONES BY THE METHOD OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING

Elena A. Bataleva

Research Station RAS in Bishkek, RS RAS, Bishkek-49, Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, Ph.D., Leading Researcher; phone: 996(312)316140, e-mail: bataleva@gdirc.ru

The paper presents the results of the analysis of data from magnetotelluric soundings performed in 2003-2020. A comparison of geoelectric models for the Chui and Kochkor basins of the Northern Tien Shan is shown. The main objective of the study is to identify patterns in the distribution of geoelectric inhomogeneities in the deep structure of the Bishkek geodynamic test site. Particular attention in geoelectric models was paid to the study of key objects of transition zones from mountain ranges to intermontane basins. The nature of crustal electrical conductivity anomalies is considered.

Keywords: magnetotelluric sounding, deep structure, zone of dynamic influence of the fault, anomaly of electrical conductivity

Первые результаты построения региональных геоэлектрических моделей Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических зондирований были показаны в работах [1,2]. Основным элементом построенных геоэлектрических моделей является коровый проводящий слой, который спорадически распространяется на всей территории Тянь-Шаня, его суммарная продольная проводимость для северной части Тянь-Шаня составляет 300-400 см, для южной достигает 1500-2000 см.

В 2003 – 2020 годах Научной станцией РАН были выполнены магнитотеллурические зондирования (МТЗ), позволяющие получать информацию о глубинном строении земной коры, по серии профилей, секущих зону сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины (рис. 1, 2); Терской хребта и Кочкор-

ской впадины [3-7]. При реализации этих работ, которые являются частью комплексных геолого-геофизических исследований по изучению литосферы Северного Тянь-Шаня, были выявлены интересные особенности в строении земной коры на разных пространственно-масштабных уровнях. Так, например, на глубинах 7 – 12 км и 30-35 км были выделены зоны повышенной электропроводности, которые имеют хорошую корреляцию с зонами низких сейсмических скоростей и аномалиями пониженной плотности. В геоэлектрических моделях также четко проявляются зоны динамического влияния активных разломов.

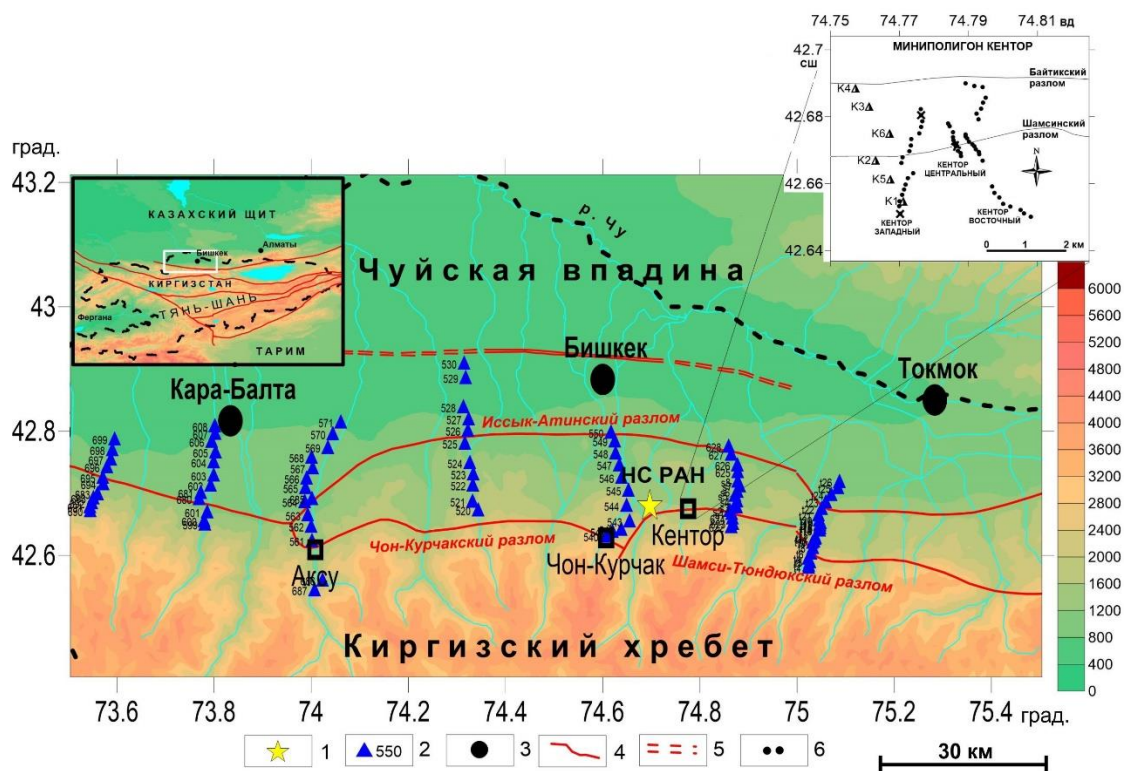


Рис. 1. Карта Чуйской впадины:

1- Научная станция РАН; 2 – пункты МТЗ; 3 – крупные населенные пункты; 4 – основные разломные структуры; 4 – землетрясения по каталогу КNET; 5 – флексурно-разрывная зона; 6 – граница Киргизской Республики. На врезке в левом верхнем углу светлым прямоугольным контуром показано положение Бишкекского геодинамического полигона (БГП); На врезке в правом верхнем углу – миниполигон Кентор

Целью настоящих исследований было изучение общих черт в распределении глубинных геоэлектрических неоднородностей, отражающих закономерности геодинамического развития территории Северного Тянь-Шаня (рис. 1). Особое внимание в геоэлектрических моделях уделялось изучению ключевых объектов переходных зон от горных хребтов к межгорным впадинам. Общие черты геофизического строения выделенных блоков свидетельствует об общей истории их развития. Эти сведения являются важными для выяснения пространственного распространения коровых проводящих слоев [3,4], выяснения их природы и происхождения [8,9], корреляции с расположением гипоцентров очагов землетрясений [10,11], а также сбора,

анализа и интерпретации геофизических данных межгорных впадин Северного Тянь-Шаня. В настоящее время метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) является наиболее глубинным среди электроразведочных методов и имеет один из самых разработанных аппаратов анализа и интерпретации полевых данных. Основным недостатком метода является его высокая чувствительность к промышленным помехам. Избежать этой проблемы можно с помощью специальной методики обработки данных (remote reference). Полевые работы, в рамках настоящего исследования, выполнялись с помощью аппаратуры производства фирмы «Феникс» (Канада) в диапазоне периодов 0.01– 1600 с. Для проведения детальных зондирований были использованы три измерительных магнитотеллурических (МТ) станции МТУ-5, позволяющих регистрировать пять компонент (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) электромагнитного поля. Шаг наблюдений по профилям составлял 200 – 300 м. Применялась стандартная крестообразная установка с длиной электрических диполей 50 м. На этапе регистрации компонент МТ-поля во избежание помех проводилась тщательная заковка индукционных датчиков, прикопка электрических диполей и подбор пар неполяризуемых электродов, разработанных ИС РАН [12].

Запись компонент МТ- поля осуществлялась в течение 16 – 20 ч. Для обработки полевых данных использовалось программное обеспечение «Phoenix Geophysics», основанное на корреляционном методе программа МТ-Corrector, разработанная в ООО «Северо-Запад» (Москва) и обладающая развитым интерфейсом и большим числом специальных возможностей и функций [13]. В программе МТ-Corrector для кривых модулей импедансов вычисляются соответствующие им расчётные фазовые кривые.

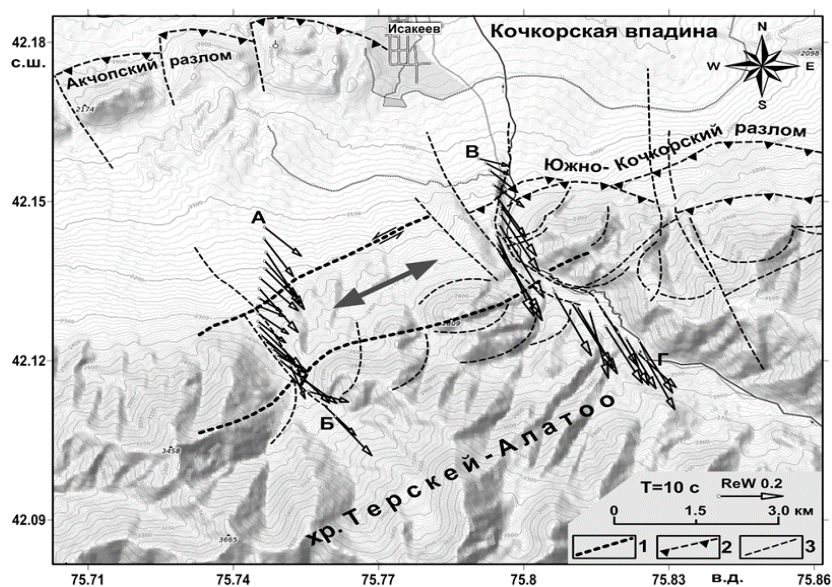


Рис. 2. Схема МТ- профилей на схеме рельефа Кочкорской впадины.

Разрывные нарушения:

1- сдвиги, 2- надвиги, 3- зоны трещиноватости в гранитах и второстепенные разломы. Стрелками показаны векторы Визе (ReW) для периода $T=10$ с. Двойная стрелка - простираение электрических структур («strike») по двум профилям МТЗ в интервале периодов 10-100 с

Далее, по степени отклонения наблюдаемой фазовой кривой от расчётной можно судить о выполнении дисперсионных соотношений и в пределах точности наблюдений корректировать импедансы. Проверка выполнения дисперсионного соотношения второго рода для данных по рассматриваемым профилям показала, что для всех пунктов МТЗ оно выполняется в большей части частотного диапазона при минимальной коррекции кривых модулей импедансов. Качественная и количественная интерпретация МТ-данных проводилась в соответствии с методикой, предложенной М.Н. Бердичевским и его коллегами [14]. Параметризация тензора импеданса и определение размерности среды производились путём расчёта и анализа МТ- параметров неоднородности и асимметрии, которые малостью своих значений подтверждают двумерность исследуемых разрезов (рис. 2). 2-D инверсия экспериментальных данных осуществлялась с помощью программы Rodi-Mackie [15].

Серия детальных профилей МТЗ, заложенных в Чуйской (рис. 3) и Кочкоркой (рис. 4) впадинах с целью получения структурных характеристик в зоне надвига Киргизского хребта на впадины, позволила выявить и основные особенности строения геоэлектрического разреза, уточнить пространственное положение разломных структур и определить зону динамического влияния разломов. Согласно геоэлектрическим моделям, построенных для зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины, в рассматриваемых разрезах проявляется три проводящих зоны: 1) низкоомный с кровлей залегания на глубинах около 5 км; 2) проводящий слой, залегающий на глубинах 10-12 км [1]; 3) коровый проводящий слой с глубиной залегания 30-35 км [1-3].

Принимая во внимание, что все профили (рис. 1) секут зону предгорного прогиба, где глубина залегания кровли фундамента достигает 4,5 км, то низкоомный слой верхней части разреза соответствует комплексу отложений новейшего орогенического комплекса. Что касается проводящих объектов в верхней части геологического разреза Северного Тянь-Шаня, то они могут быть связаны с гидротермальными источниками, обнаруженными вдоль всего Киргизского хребта (так называемая «термальная линия Тянь-Шаня»), часть из них в геоэлектрических разрезах проявляются субвертикальными проводящими зонами (месторождение термальных вод Иссык-Ата, Горячие ключи и др.) или объектами, например, 6 и 10 на рис. 3.

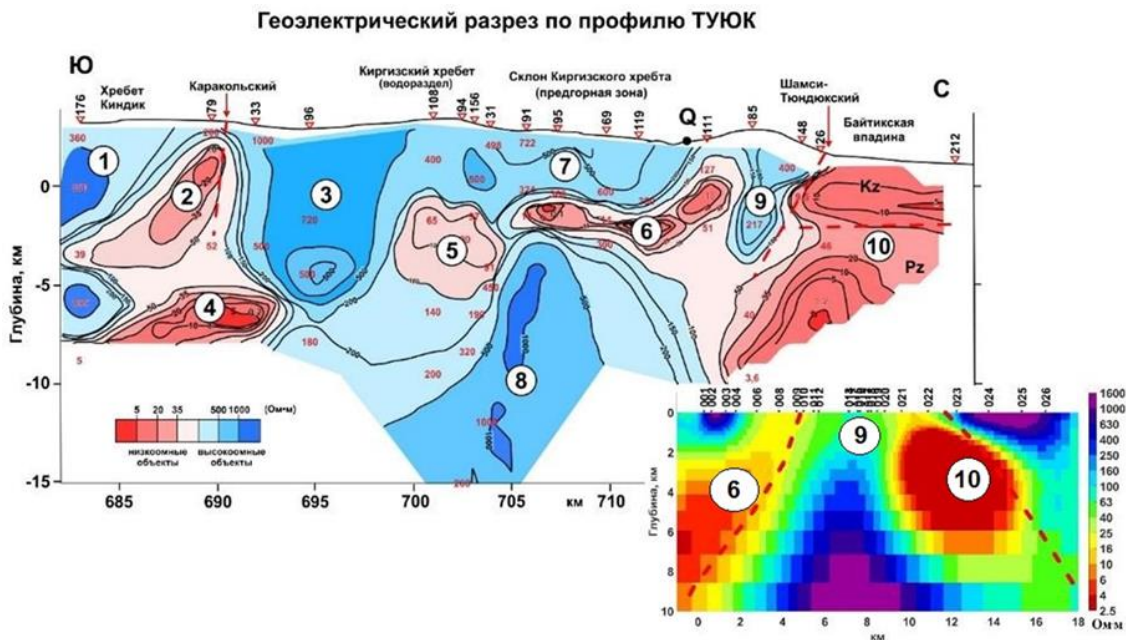


Рис. 3 - Сводный геоэлектрический разрез по профилю Туук. Цифрами в кружках обозначены геологические тела (блоки) с различной проводимостью

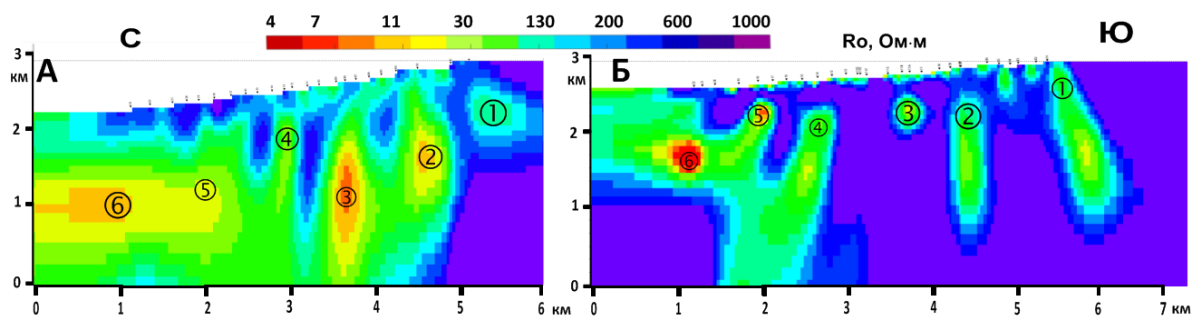


Рис.4. Геоэлектрические модели южного борта Кочкорской впадины по профилям Укок (А) и Курчак-Укок (Б). Положение профилей см. на рис. 2. Градация от черного к белому соответствует понижению сопротивления пород (шкала удельных сопротивлений – справа). Цифрами на обоих профилях отмечены соответствующие друг другу проводящие структуры

Проводящие слои в верхней части геологического разреза (рис. 4) также могут образоваться в зонах катакластического разрушения горных пород [18]. Основными разрывными нарушениями на рассматриваемой территории являются Иссык-Атинский, Шамси-Тюндукский (Чуйская впадина) и Южно-Кочкорский (Кочкорская впадина) разломы, разделяющие различные по масштабам блоки, на геоэлектрическом разрезе отчетливо проявлены субвертикальными зонами с минимально низкими значениями сопротивлений (рис. 3, 4). Характер залегания разломных структур совпадает с положением плоскостей разломов, определенным по геолого-структурным данным на поверхности.

Природу проводимости разломных зон можно объяснить либо наличием гальванически связанных графитовых пленок, либо существованием флюидов, расплавы горных пород в континентальной земной коре маловероятны. В некоторых случаях эти проводящие зоны отображаются в сейсмических данных как волноводы [19]. В этом случае проводимость пород зависит от степени их дробления и трещиноватости, связности трещин между собой и насыщенных флюидами. Существование высокоминерализованных флюидов на глубинах 7 – 10 км подтверждено результатами исследований сверхглубоких скважин Кольской и Саатлинской [19].

Таким образом, проанализированы глубинные геоэлектрические разрезы вдоль серии геофизических профилей, секущих зону сочленения Киргизского хребта и впадин Северного Тянь-Шаня. Рассмотрены общие черты геоэлектрических моделей южных бортов впадин Северного Тянь-Шаня – Чуйской и Кочкорской. Область повышенной электропроводности в верхней части земной коры этих впадин может быть обусловлена наличием зон катакластического разрушения пород. Коровый проводящий слой, спорадически распространенный на всей исследуемой территории можно объяснить флюидной природой проводимости

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Научной станции РАН по теме АААА-А19-119020190063-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баталев В.Ю., Волыхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В. Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ // В кн. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. – М.: Наука, 1993. – С. 96-113.
2. Trapeznikov Yu.A., Andreeva E.V., Batalev V.Yu., Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Volykhin A.M., Golubtsova N.S., Rybin A.K. Magnetotelluric soundings in the Kyrgyz Tien Shan // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 1997. – № 1 (33). – С. 1-17.
3. Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // *Геология и геофизика*. – 2008. – №5. – С. 445-460.
4. Баталева Е.А., Пржиялговский Е.С., Баталев В.Ю., Лаврушина Е.В., М.Г. Леонов, В.Е. Матюков, Рыбин А.К. Новые данные о глубинном строении Южнокочкорской зоны концентрированной деформации // *Доклады Академии наук*. 2017. – № 5 (475). – С. 571–575.
5. Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Леонов М.Г., Рыбин А.К. Структуры чехла и поверхности фундамента Кочкорской впадины (Тянь-Шань) по геологическим и геофизическим данным // *Геология и геофизика*. – 2018. – № 4 (59). – С. 417-436. DOI: 10.15372/GiG20180401.
6. Баталева Е.А., Матюков В.Е. Детальное глубинное строение прибортовой зоны Иссык-Кульской впадины на примере профиля Саруу // *Вестник КРСУ*. – 2018. – № 4(18). – С.150-155.
7. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Морозов Ю.А., Непейна К.С. Глубинное строение литосферы Центрального Тянь-Шаня по профилю магнитотеллурического зондирования “Сон-Куль” // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2021. – № 2(496). – С. 115-121. – DOI: 10.31857/S268673972102016X.

8. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. К вопросу о природе электропроводности литосферы Центрального Тянь-Шаня и сопредельных территорий // В сборнике: Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов Материалы докладов Шестого международного симпозиума к 35-летию Научной станции РАН и 15-летию Международного научно-исследовательского центра - геодинамического полигона Бишкек: НС РАН. – 2015. – С. 155-160.
9. Рыбин А.К., Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Брагин В.Д., Морозов Ю.А., Щелочков Г.Г. Природа верхнекоровых электропроводящих горизонтов и инфраструктура гранитов Центрального Тянь-Шаня // Докл. АН. – 2016. – № 2(470). – С. 215–218.
10. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields // *Journal of Applied Geophysics*. – 2020. – 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.
11. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Кожоголов К.Ч., Никольская О.В., Мамыров Э.М. Современная геодинамическая активность земной коры Северного Тянь-Шаня и опасные геологические процессы // Вестник КРСУ. – 2016. – № 3 (16). – С. 157-163.
12. Лосихин Л.Н., Матюков Е.К., Пазников В.А. и др. Неполяризуемый электрод для наземной геофизической электроразведки / Патент на полезную модель RU 123979 U1, опубликовано 10.01.2013 г.
13. MT-Corrector [Электронный источник]. URL: <http://nw-geo.ru/products/software/mt-corrector/> (Дата обращения: 10.03.2021).
14. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.В., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. – М., Диалог МГУ. – 1997. – 161 с.
15. Rodi W. L., Mackie R. L., Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. – 2001. – V. 66. – P. 174–187.
16. Баталева Е.А. Активные разломы в структуре БГП и их отражение в электромагнитных параметрах // В сборнике: Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, посвященной столетию М.В. Гзовского. Москва, – 2020. – С. 139-146.
17. Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Matyukov V.E., Aleksandrov P.N. Definition of the seismic field of the underground sources in the ambient seismic noise in the Tien Shan region using a three-component gradient system // *Journal of Earth Science*. – 2020. – 31 (5). – P. 988–992. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1327-5>.
18. Киссин И.Г. Катакластическое разрушение пород земной коры и аномалии геофизических полей // *Физика Земли*. – 1996. – № 4. – С. 30 – 40.
19. Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М. Государственный научный центр РФ – ВНИИГеосистем. – 2003. – 184 с.

REFERENCES

1. Batalev V.YU., Volyhin A.M., Rybin A.K., Trapeznikov YU.A., Finyakin V.V. Stroenie zemnoj kory vostochnoj chasti Kirgizskogo Tyan'-SHanya po dannym MTZ i GMTZ // V kn. *Proyavlenie geodinamicheskikh processov v geofizicheskikh polyah*. – М.: Nauka, 1993. – S. 96-113.
2. Trapeznikov Yu.A., Andreeva E.V., Batalev V.Yu., Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Volykhin A.M., Golubtsova N.S., Rybin A.K. Magnetotelluric soundings in the Kyrgyz Tien Shan // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 1997. – № 1 (33). – S. 1-17.
3. Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Matyukov V.E., Spichak V.V. Array magnetotelluric soundings in the active seismic area of Northern Tien Shan // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. – № 5(49). – P.337-349. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.09.014.

4. Bataleva E.A., Batalev V.Y., Matyukov V.E., Rybin A.K., Przhiyalgovskii E.S., Lavrushina E.V., Leonov M.G. New data on the deep structure of the South Kochkor zone of concentrated deformation // *Doklady Earth Sciences*. – 2017 – № 2 (475). – P. 930-934. DOI: 10.1134/S1028334X1708013X.
5. Przhiyalgovskii E.S., Lavrushina E.V., Leonov M.G., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Rybin A.K. Structure of the basement surface and sediments in the Kochkor basin (Tien Shan): geological and geophysical evidence // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – № 4(59). P. 335-350. DOI: 10.1016/j.rgg.2017.09.003.
6. Bataleva E.A., Matyukov V.E. Detal'noe glubinnoe stroenie pribortovoj zony Issyk-Kul'skoj vpadiny na primere profilya Saruu // *Vestnik KRSU*. – 2018. – № 4 (18). – S. 150-155.
7. Rybin A.K., Bataleva E.A., Matyukov V.E., Morozov Yu. A., Nepeina K. S. Glubinnoe stroenie litosferu tcentral'nogo Tyan'-Shanya po profiluy magnitotelluricheskogo zondirovaniya "Son-kul'" // *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk. Nauki o Zemle*. – 2021. — № 2(496). – S. 115–121. – DOI: 10.1134/S1028334X21020161.
8. Bataleva E.A., Batalev V.YU. K voprosu o prirode elektroprovodnosti litosfery Central'nogo Tyan'-SHanya i sopredel'nyh territorij // V sbornike: Problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinental'nyh orogenov Materialy dokladov SHestogo mezhdunarodnogo simpoziuma k 35-letiyu Nauchnoj stancii RAN i 15-letiyu Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo centra - geodinamicheskogo poligona Bishkek: NS RAN. – 2015. – S. 155-160.
9. Rybin A.K., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Bragin V.D., Schelochkov G.G., Leonov M.G., Przhiyalgovskii E.S., Morozov Y.A. Nature of electric conductive layers of the upper crust and infrastructure of granites of the central Tien Shan // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – № 1(470). – P. 968-971.
10. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields // *Journal of Applied Geophysics*. – 2020. – 104144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>.
11. Rybin A.K., Bataleva E.A., Leonov M.G., Przhiyalgovskij E.S., Kozhogulov K.CH., Nikol'skaya O.V., Mamyrov E.M. Sovremennaya geodinamicheskaya aktivnost' zemnoj kory Severnogo Tyan'-SHanya i opasnye geologicheskie processy // *Vestnik KRSU*. – 2016. – № 3(16). – S. 157-163.
12. Losihin L.N., Matyukov E.K., Paznikov V.A. i dr. Nepolyarizuyushchij elektrod dlya nazemnoj geofizicheskoj elektrorazvedki / Patent na poleznuyu model' RU 123979 U1, opublikovano 10.01.2013 g.
13. MT-Corrector [Electronic source]. URL: <http://nw-geo.ru/products/software/mt-corrector/> (Date of access: 08.10.2018).
14. Berdichevskij M.N., Dmitriev V.I., Novikov D.V., Pastucan V.V. Analiz i interpretaciya magnitotelluricheskikh dannyh. – M., Dialog MGU. – 1997. – 161 s.
15. Rodi W. L., Mackie R. L., Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. – 2001. – V. 66. – P. 174–187.
16. Bataleva E.A. Aktivnye razlomy v strukture BGP i ih otrazhenie v elektromagnitnyh parametroh // V sbornike: Pyataya tektonofizicheskaya konferenciya v IFZ RAN. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o zemle. materialy dokladov vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj stoletiyu M.V. Gzovskogo. Moskva, – 2020. – S. 139-146.
17. Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Matyukov V.E., Aleksandrov P.N. Definition of the seismic field of the underground sources in the ambient seismic noise in the Tien Shan region using a three-component gradient system // *Journal of Earth Science*. – 2020. – 31 (5). – P. 988–992. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1327-5>.
18. Kissin I.G. Kataklasticheskoe razrushenie porod zemnoj kory i anomalii geofizicheskikh polej // *Fizika Zemli*. – 1996. – № 4. – S. 30 – 40.

19. Karakin A.V., Kur'yanov YU.A., Pavlenkova N.I. Razlomy, treshchinovatye zony i volnovody v verhnih sloyah zemnoj obolochki. M. Gosudarstvennyj nauchnyj centr RF – VNIIGeo-sistem. – 2003. – 184 s.

© *Е. А. Баталева, 2021*