

## Результаты мониторинга зон динамического влияния разломных структур Северного Тянь-Шаня

*Е. А. Баталева*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научная станция РАН, г. Бишкек, Республика Кыргызстан  
e-mail: bataleva@gdirc.ru

**Аннотация.** Представлены результаты мониторинговых исследований разломных структур Северного Тянь-Шаня, где проводятся режимные (регулярные) наблюдения методом магнитотеллурического зондирования за состоянием геологической среды при воздействии геодинамических процессов. Разломные зоны, выделенные по геологическим и электромагнитным данным, проявляются в верхней части разреза как субвертикальные объекты с высокой электропроводностью, обусловленной повышенной трещиноватостью, и имеют хорошую корреляцию с лунно-солнечными приливными воздействиями. Связь поведения вариаций геофизических полей и напряженно-деформированного состояния земной коры в сейсмоактивных районах Тянь-Шаня рассмотрена на основе анализа корреляций между компонентами лунно-солнечных приливных воздействий, вариаций электромагнитных параметров, распределения сейсмических событий.

**Ключевые слова:** магнитотеллурический мониторинг, глубинное строение, зона динамического влияния разлома

## The results of monitoring the zones of dynamic influence of the fault structures of the Northern Tien Shan

*E. A. Bataleva*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyzstan  
e-mail: bataleva@gdirc.ru

**Abstract.** The results of monitoring studies of the fault structures of the Northern Tien Shan are presented, where regime (regular) observations by the magnetotelluric sounding method are carried out over the state of the geological environment under the influence of geodynamic processes. Fault zones identified from geological and electromagnetic data appear in the upper part of the section as subvertical objects with high electrical conductivity due to increased fracturing and have a good correlation with lunisolar tidal effects. The relationship between the behavior of geophysical fields variations and the stress-strain state of the Earth's crust in the seismically active regions of the Tien Shan is considered based on the analysis of correlations between the components of lunar-solar tidal influences, variations in electromagnetic parameters, and the distribution of seismic events.

**Keywords:** magnetotelluric monitoring, deep structure, zone of dynamic fault influence

### *Введение*

Для сейсмоактивных регионов, таких как Тянь-Шань, задача мониторинга геодинамических процессов, проявляющихся в различных геофизических полях, является одной из наиболее актуальных. Геодинамические процессы приводят к изменению напряженно-деформированного состояния крупных блоков литосферы и сопровождаются вариациями физических параметров горных пород

и генерацией геофизических полей. Наиболее ярко эти процессы проявляются в активных разломных структурах (рис.1).

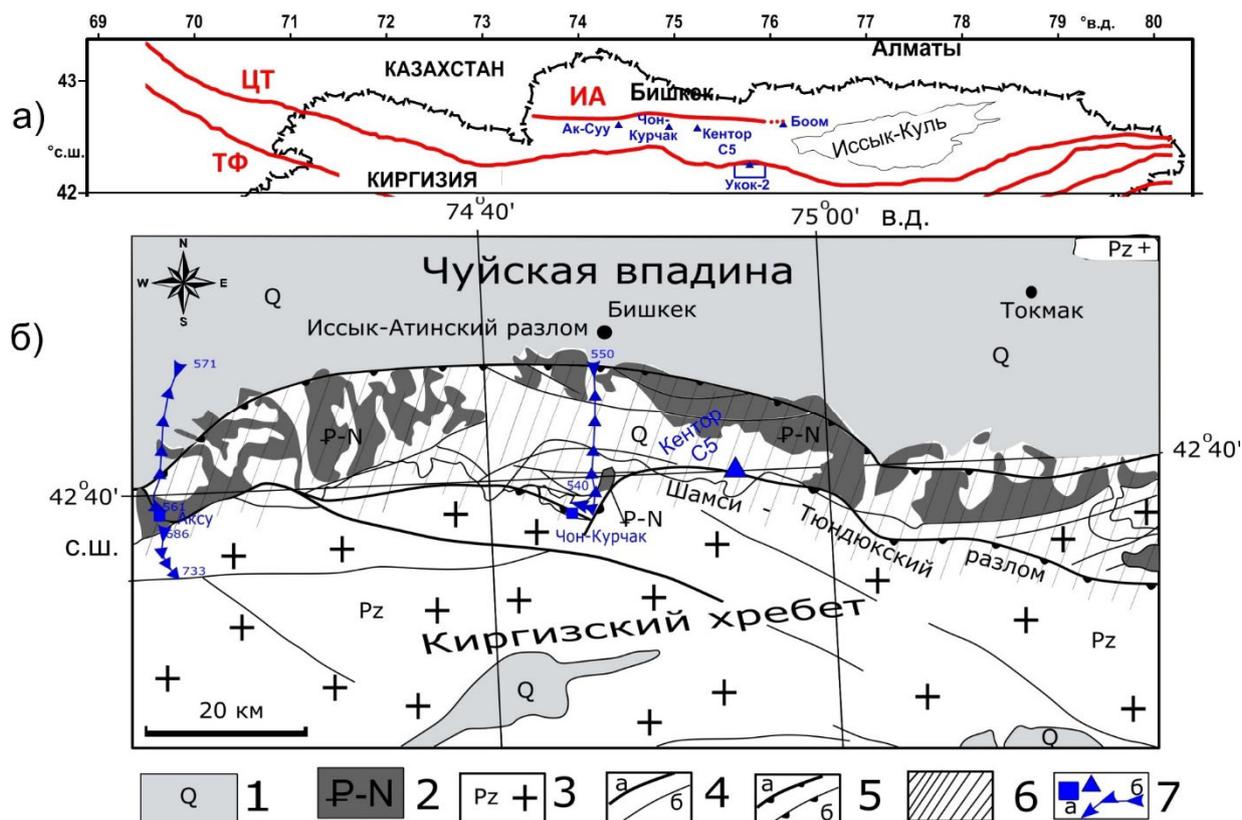


Рис. 1. Схема расположения разломных структур и мониторинговых пунктов во впадинах Северного Тянь-Шаня:

а) общая схема; б) Чуйская впадина. Зона сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины: 1 - четвертичные отложения; 2 - палеоген-неогеновые отложения; 3 - палеозойские породы фундамента; 4 - активные разломы: главные (а) и второстепенные (б); 5 - взбросы и надвиги: главные (а) и второстепенные (б); 6 - зона альпийской активизации; 7 - пункты электромагнитного мониторинга: стационарные (а), режимные (б)

На сегодняшний день существует достаточно много исследований, посвященных изучению разломных зон на различных геодинамических полигонах [1-10 и др.]. Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) очень чувствителен к любым нарушениям сплошности горных пород (области повышенной трещиноватости, разломные структуры, зоны дробления и т. д.), которые являются одним из важнейших источников информации о геодинамических процессах, происходящих в земной коре [2, 11, 12].

Целью настоящей работы являлись мониторинговые исследования зон динамического влияния разломов Северного Тянь-Шаня на предмет взаимосвязи с современными геодинамическими процессами. Основные задачи заключались в: детализации геоэлектрической структуры разломных структур [2, 6, 9, 12]; развитии методики для изучения необратимых деформаций [13]; изучении корреля-

ционной зависимости электромагнитных и деформационных параметров [11,12, 14-17]. Объектами исследования служили зоны динамического влияния:

1. Иссyk-Атинского разлома, представляющего собой активный надвиг южного обрамления Чуйской впадины и контролирующего зону сочленения Киргизского хребта с впадиной в обстановке сжатия;

2. Шамси-Тюндюкского разлома, который на дневной поверхности отделяет горную часть Киргизского хребта от предгорий и служит границей палеозойских отложений и кайнозойских отложений, с применением данных комплекса электроразведочных методов (частотное зондирование, магнитотеллурическое зондирование в различных модификациях) (рис.1). Выше обозначенные разломные структуры имеют субширотное простирание и находятся в предгорьях горных хребтов.

В настоящий момент мониторинговые исследования в Чуйской впадине проводятся на нескольких участках: 1) на северном склоне Киргизского хребта в зоне сочленения с Чуйской впадиной (Байтикская впадина), между реками Норус и Алмалы – миниполигон Кентор; 2) в стационарных пунктах Ак-Суу и Чон-Курчака, расположенном в непосредственной близости от Иссyk-Атинского и Чон-Курчакского разломов, соответственно; 3) в режимном пункте Боом (рис.1).

Горные породы верхней коры Северного Тянь-Шаня в значительной степени представлены разновозрастными гранитоидами, которые составляют около 70-80 % общего объема верхней коры и определяют реологические свойства верхнекорового горизонта. В зонах сочленения хребтов и впадин отмечается наибольшая дезинтеграция гранитоидов, результатом которой является изменение прочности горных пород, появление блочной делимости и формирование систем разрывных нарушений. Принято считать [2, 3, 11], что верхнекоровые проводящие слои представляют собой блоки интенсивно дезинтегрированных пород, насыщенных водным флюидом. Максимальная степень дезинтеграции гранитоидов наблюдается вблизи разломных структур регионального уровня и на различных пространственно-масштабных уровнях палеозойского фундамента. Согласно результатам электромагнитных исследований [18-20], в верхней части геоэлектрического разреза существует два низкоомных слоя которые могут иметь хорошую корреляцию с волноводами и являться зонами концентрации очагов слабых землетрясений [19, 20]. Один из низкоомных слоев проявляется практически повсеместно в обеих впадинах в интервале глубин от 2 до 5 км [1-3;18]. Его проводимость обусловлена пористостью горных пород этого слоя, которая на порядок выше, чем в высокоомной коре. Второй проводящий слой по разным оценкам расположен на глубинах 8-12 км [1, 3, 18]. В качестве причин возникновения разуплотненных горизонтов в земной коре Тянь-Шаня можно рассматривать [20] такие факторы, как отклик Индо-Евразийской коллизии; дегидратация амфиболитов; неравновесное состояние среды и т.д.

Необходимо отметить, что в геоэлектрических построениях наиболее четко зоны тектонических нарушений проявляются до глубин порядка 20-25 километров [1, 6, 9,20], поэтому особое внимание уделялось поведению электромагнитных параметров в пунктах магнитотеллурического мониторинга, приуроченных

именно к активным разломным структурам. Отчасти это связано с тем, что существует предположение о тесной взаимосвязи процессов разломообразования и сейсмичности. При этом особый интерес вызывает вопрос о процессе возникновения сейсмических событий при активизации разломов и закономерностях миграции очагов землетрясений в них.

Взаимосвязь поведения вариаций геофизических полей и напряженно-деформированного состояния земной коры Тянь-Шаня в сейсмоактивных районах рассматривается в данной работе на основе анализа корреляций между компонентами лунно-солнечных приливных воздействий, вариаций электромагнитных параметров и распределения сейсмических событий для режимных пунктов МТЗ Северного Тянь-Шаня (рис. 1). Примером такого анализа, представленным в работе, являются пункты наблюдения С5 (миниполигон Кентор) и Боом.

### ***Методы и материалы***

Метод магнитотеллурического зондирования, основанный на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли, является одним из основных методов электромагнитного мониторинга Бишкекского геодинимического полигона (БГПГ). Использование этого метода позволяет отслеживать скрытые разломные структуры, не проявляющиеся в осадочном чехле, но являющиеся зонами повышенной трещиноватости и флюидопроницаемости фундамента и проявляющиеся аномалиями геофизических полей. Изменяя диапазон регистрируемых частот, можно получать информацию об электропроводности геологического разреза с разных глубин в зависимости от решаемых задач. Экспериментальные наблюдения в модификации глубинного магнитотеллурического зондирования проводились с использованием приборов MTU фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада). Диапазон измеряемых вариаций МТ-поля для решения структурных задач составляет от 0,01 до 1600 с. Время записи при мониторинговых исследованиях зависит от поставленных задач. Полученные данные обработаны с помощью программы МТ-Corrector, разработанной в российской геофизической компании «Северо-Запад». После стандартной обработки полученных данных для каждого режимного пункта наблюдения были построены частотно-временные ряды (ЧВР) всех электромагнитных параметров в соответствии с технологией азимутального магнитотеллурического мониторинга, заключающейся в анализе полученных ЧВР для определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований.

### ***Результаты***

На рис. 2 и 3 представлены результаты мониторинговых наблюдений для двух режимных пунктов – С5, расположенном на миниполигоне Кентор, и пункте Боом.

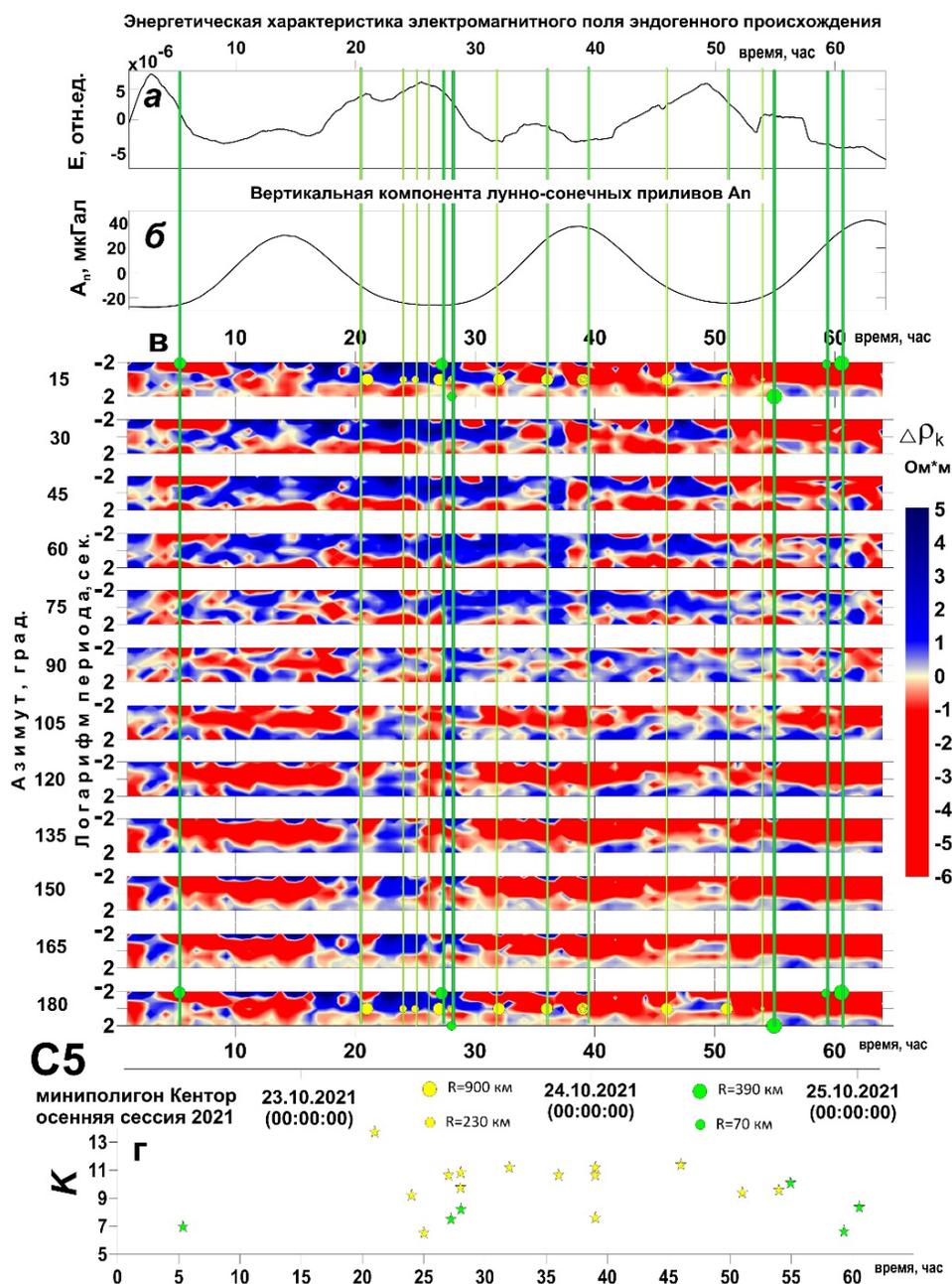


Рис. 2. Результаты азимутального МТ мониторинга на миниполигоне Кентор во время осенней сессии 2021 года (22.10.2021-25.10.2021): (а) эндогенная характеристика электромагнитного поля, (б) вертикальная компонента лунно-солнечных приливов  $A_n$ , (в) псевдоразрезы с шагом поворота  $15^\circ$  (ЧВР  $\Delta\rho_k$ ). Гипоцентры землетрясений из сейсмических каталогов Киргизии (KNET+KRNET) и Казахстана (NNC)

На миниполигоне Кентор мониторинговые исследования выполняются в двух модификациях- профильный мониторинг и режимные наблюдения с 2012 года. В результате выполненных исследований построены детальные модели глубинного геоэлектрического строения вдоль трех профилей, секущих зону активного Шамси-Тюндукского разлома. На основе полученных моделей опреде-

лено местоположение зоны динамического влияния разломной структуры и выбраны пункты режимного мониторинга.

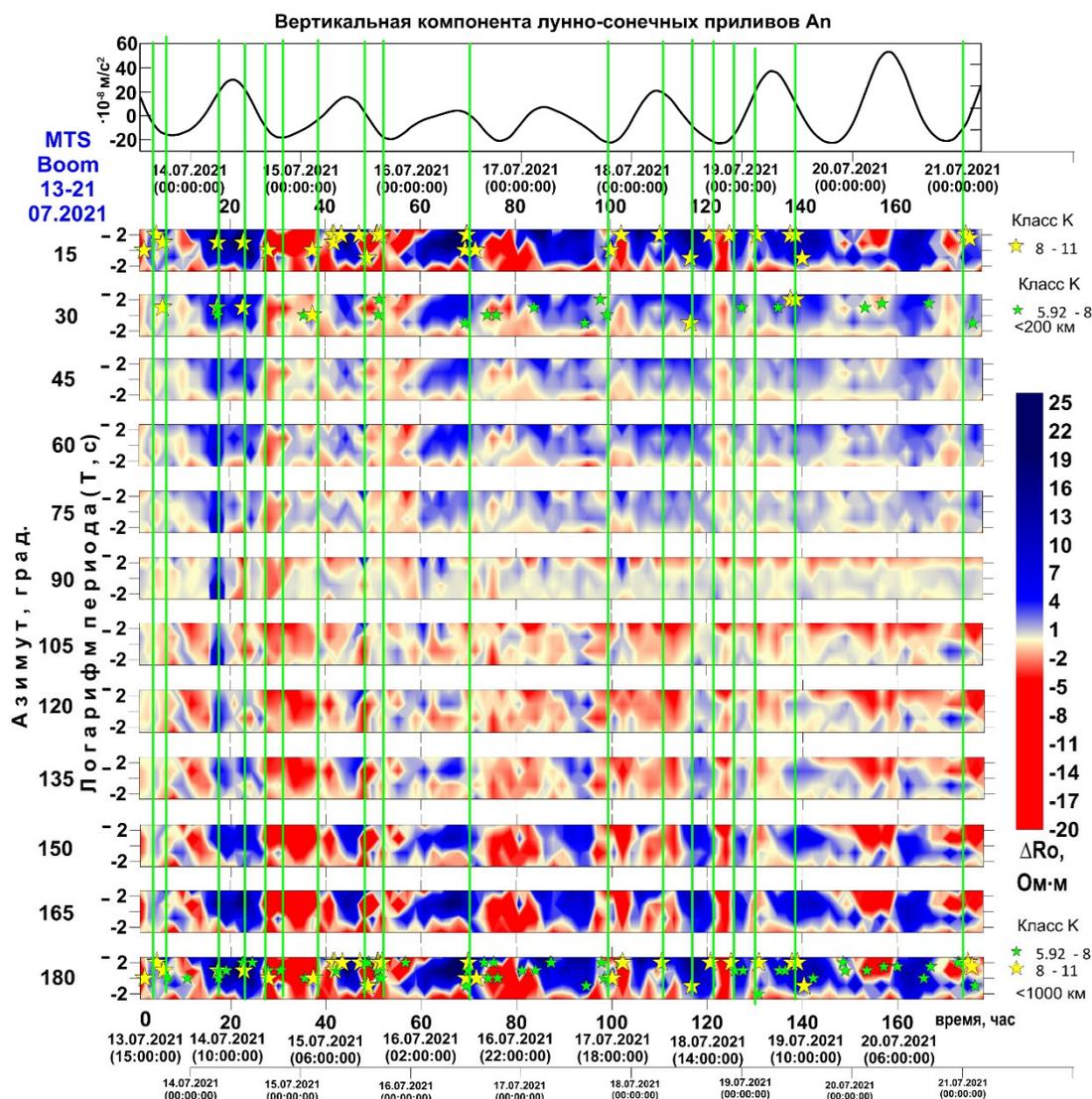


Рис. 3. Результаты азимутального МТ мониторинга на режимном пункте Боом (13.07.2021-21.07.2021): сверху - вертикальная компонента лунно-солнечных приливов  $A_p$ , снизу - псевдоразрезы с шагом поворота  $15^\circ$  (ЧВР  $\Delta R_k$ ). Гипоцентры землетрясений из сейсмических каталогов Киргизии (KNET+KRNET) и Казахстана (NNC)

Характер распределения сейсмичности с 20 по 51 час записи (рис.2) свидетельствует о приуроченности гипоцентров сейсмических событий к определенному глубинному уровню, соответствующему первому верхнекоровому проводнику и лишь несколько событий, произошло вблизи дневной поверхности. Наблюдаются изменения кажущегося сопротивления в ортогональных направлениях практически для всех землетрясений, представленных на рисунке 2, для азимутов  $0-75^\circ$  максимумам лунно-солнечных приливных воздействий соответ-

ствует увеличение кажущегося сопротивления, минимумам - уменьшение. Что касается результатов, которые представлены на рисунке 3, то основные закономерности взаимосвязи поведения электромагнитных параметров, лунно-солнечных приливов и распределения сейсмичности характерные для пункта С5 полигона Кентор, присущи и мониторинговому пункту Боом. Большинство гипоцентров сейсмических событий, зарегистрированных сетью KNET (показаны на псевдоразрезе 30°) во время проведения мониторинговых работ на пункте наблюдения Боом, также приурочены к низкоомному слою, залегающему на глубинах 2-5 км. Сами землетрясения происходят либо во время изменения кажущегося сопротивления в ортогональных направлениях, либо приурочены к градиентным зонам изменения сопротивления.

### ***Заключение***

Выполненные работы показали, что МТЗ является эффективным методом для исследования зон динамического влияния разломных структур сейсмически активных регионов. На примере результатов, полученных на двух пунктах мониторинговых наблюдений в Чуйской впадине Северного Тянь-Шаня, проанализированы основные закономерности взаимосвязи поведения электромагнитных параметров зон динамического влияния разломных зон и современных геодинамических процессов (лунно-солнечных приливных воздействий и землетрясений).

### ***Благодарности***

Исследование выполняется по темам государственного задания НС РАН № ЕГИСУ НИОКТР АААА-А20-120102190009-9 и № Минобрнауки России 1021052806454-2-1.5.1.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2018. – № 2. – С.461-487.
2. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Детализация геоэлектрической структуры зоны сочленения Чуйской впадины и Киргизского хребта (миниполигон Кентор) // *Вестник КРСУ*. – 2018. – Т.18. – №12. – С.134-140.
3. 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. 54-63.
4. Баталева Е. А. Изучение глубинного строения сейсмоактивных зон методом магнитотеллурического зондирования // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология"*: Материалы XVII международной научной конференции (г. Новосибирск, 19-21 мая 2021 г.) – ИНГГ СО РАН – Новосибирск – 2021. – Т 2(1). – С.345-353.
5. Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Рубанова Е.С., Василевский А.Н., Куликова А.В., Баталева Е.А. Среднепозднепалеозойские геодинамические комплексы и структура Горного Алтая, их отражение в гравитационном поле // *Геология и геофизика*. – 2017. – Т. 58. – № 11. – С. 1617 – 1632.

6. Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика. – 2008. – Т.49. – №11. – С. 1139-1149.
7. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 93-107.
8. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.
9. Баталева Е. А., Баталев В. Ю. К вопросу о зонах динамического влияния разломных структур // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, Москва, 03–08 октября 2016 года. – Москва: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2016. – С. 350-354.
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.
11. Баталева Е. А. Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 468 – № 3. – С. 319.
12. 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. – Т. 59 – № 4. – С. 417–436.
13. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) // Вестник КРАУНЦ. – 2019. – № 2(42). – С. 42-56.
14. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. – М.:Недра. – 1992. – 250 с.
15. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2014. – Т. 14. – № 7. – С. 3-7.
16. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ-мониторинг // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2014. – Т. 14. – № 7. – С. 8-12.
17. Александров П.Н., Баталева Е.А. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618606. – М., 2019. – 1 с.
18. Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитными методами. В сб.: Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. – Бишкек. – 2009. – В. 4. – С. 74–84.
19. Ваньян Л.Л. О природе электропроводности активизированной земной коры // Физика Земли. – 1996. – № 6. – С. 93–95.
20. Рыбин А.К. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. – М.: Науч. Мир. – 2011. – 232 с.