

УДК 550.372 (575.23)

**ДЕТАЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЫ  
ИССЫК-КУЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ НА ПРИМЕРЕ ПРОФИЛЯ “САРУУ”**

*Е.А. Баталева, В.Е. Матюков*

Представлены результаты интерпретации данных магнитотеллурического зондирования и построены геоэлектрические разрезы для южного борта Иссyk-Кульской впадины. Проведено сопоставление сейсмичности исследуемого региона с построенными геоэлектрическими разрезами.

*Ключевые слова:* геоэлектрическая структура; геофизические поля; сейсмическая активность; геодинамические процессы; Северный Тянь-Шань.

**DETAILED DEEP STRUCTURE OF THE BASIN FLANK ZONE  
OF THE ISSYK-KUL DEPRESSION BASED ON THE EXAMPLE OF THE SARUU PROFILE**

*E.A. Bataleva, V. E. Matyukov*

The results of the interpretation of magnetotelluric sounding data are presented and geoelectric sections for the southern side of the Issyk-Kul Basin are constructed. The seismicity comparison of the studied region with the constructed geoelectric sections is carried out.

*Keywords:* geoelectric structure; geophysical fields; seismic activity; geodynamic processes; Northern Tien Shan.

Основой для построения глубинных геоэлектрических моделей в Научной станции РАН служат магнитотеллурические зондирования (МТЗ), которые позволяют изучать электрических свойств коры и мантии, и способствует получению новых знаний о глубинной структуре и динамике земных недр. Построенные геоэлектрические разрезы позволяют проследить развитие разломных зон по глубине, определить характеристики областей повышенной пористости, флюидонасыщенности и зон частичного плавления.

Практическое применение МТЗ в условиях горного рельефа Тянь-Шаня осложнено трудностями выбора подходящих площадок для установки измерительной системы, что не позволяет обеспечить равномерное расположение пунктов зондирования вдоль профиля исследования, и наличием приповерхностных неоднородностей. Особенно сильно это проявилось в региональных МТ-исследованиях Центрального Тянь-Шаня по профилю “Барскаун” на участке южного борта Иссyk-Кульской впадины [1, 2]. Региональный профиль “Барскаун” пересекает Тяньшанский ороген в меридиональной полосе вблизи 78 градуса в.д., соответственно, в центральной части профиля имеется 60-км сегмент пересечения акватории

озера Иссyk-Куль, где отсутствуют МТЗ. Помимо этого, на участке профиля, включающего в себя южный берег и горное обрамление Иссyk-Куля, с допустимым качеством было выполнено всего лишь несколько пунктов зондирования. Для верификации результатов интерпретации МТ-данных по региональному профилю “Барскаун” и детализации геолого-геофизического строения (рисунок 1) южного борта Иссyk-Кульской впадины силами Научной станции РАН в последние годы были проведены дополнительные профильные МТ-зондирования.

Отметим, что в рамках ранее выполненных региональных профильных МТ-исследований на территории Центрального Тянь-Шаня (включая профиль “Барскаун”) были построены блочные 2D геоэлектрические модели, основным элементом которых является слой повышенной проводимости с залеганием кровли на глубинах 20–30 км [1, 2]. При этом была отмечена близость положения электропроводящего слоя и зоны пониженных сейсмических скоростей – волновода, выявленного в сейсмографических исследованиях. Однако, более поздние сейсмографические построения дают противоречивые оценки глубин слоя с дефицитом скорости сейсмических волн под

Иссык-Кульской впадиной: так, например, в работах Т.М. Сабитовой, С. Рекера [3,4] – 25–30 км, дают глубину залегания в 60–70 км [4, 5]. В этой ситуации задача построения геоэлектрической модели земной коры южного борта Иссык-Кульской впадины, с использованием современных возможностей метода МТЗ-МВЗ, и уточнения параметров регионального проводящего слоя является весьма актуальной.

**Магнитотеллурические зондирования по профилю “Саруу”.** Профильные МТЗ выполняли на южном берегу озера Иссык-Куль, в ущелье Саруу, длина профиля около 45 км, шаг – 4 км. На противоположном берегу озера по ущелью реки Чон-Аксу (с. Григорьевка) синхронно выполняли МТЗ, которые затем использовались в качестве удаленной базы. Измерения выполняли с помощью аппаратуры Phoenix MTU-5 [6]. Регистрирующие блоки станций используют 24-х разрядный АЦП и GPS приемники, обеспечивающие синхронизацию по времени с точностью 1 мкс. Диапазон измеряемых вариаций МТ-поля составляет от 0.0025 до 1600 с. Средняя длительность записи – одни сутки. Измерение трех компонент магнитного поля проводили с помощью штатных индукционных датчиков МТС-50, ориентированных на север, восток и вертикально. Компоненты электрического поля измеряли диполями длиной 50 м, заземленными неполяризующимися электродами с марганцево-угольной крошкой.

**Обработку записей** проводили в программе EPI-KIT геофизической компании ООО “Северо-Запад” (г. Москва). В основе программы EPI-KIT лежит математическое вычислительное ядро, основанное на корреляционном методе и робастной статистике. Спектры вычисляются с использованием оконных функций. В расчетах участвуют окна разной формы и длины. В основе блока расчёта спектров находится алгоритм быстрого преобразования Фурье. Анализ точности каждой из спектральных оценок и отбраковка непригодных значений происходит с помощью двух робастных процедур: “Jack Knife” и итерационные взвешивания с использованием функций Хьюбера и Томпсона. Далее с учетом полученных весов робастно определяются интересующие нас характеристики.

В качестве удаленной базы использовали синхронные записи с противоположного берега озера Иссык-Куль (рисунок 1). Для дополнительного контроля процесса получения импедансных кривых, записи были также обработаны в стандартной программе обработки SSMT2000 для аппаратуры фирмы “Phoenix Geophysics”. Кривые, полученные в результате работы программы EPI-KIT, не отли-

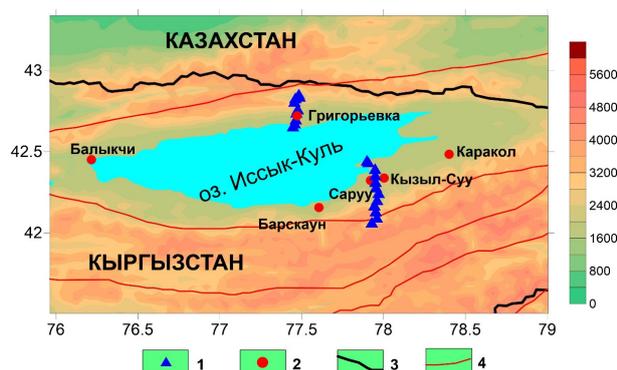


Рисунок 1 – Схема района работ: 1 – пункты МТЗ; 2 – населенные пункты; 3 – границы Кыргызской Республики; 4 – разломные структуры

чаются по форме и уровню от полученных SSMT 2000, однако во всех случаях имеют меньший разброс значений амплитудных и фазовых кривых.

На втором этапе обработки с помощью программы MT-Corrector, разработанной сотрудниками российской геофизической компании “Северо-Запад”, было произведено осреднение импедансных кривых. Программа MT-Corrector позволяет контролировать дисперсионные соотношения, связывающие модуль и фазу компонент тензора импеданса [7]. Для большинства записей дисперсионные соотношения выполняются, за исключением частотных диапазонов с повышенной зашумленностью записей. Такое выполнение дисперсионных соотношений для кривых профиля “Саруу” может свидетельствовать в пользу предположения о квазидвумерности геоэлектрических структур профильного разреза.

Анализ векторов Визе–Паркинсона позволяет локализовать зоны проводящих неоднородностей с достаточной надежностью на всех глубинах. На рисунке 2 изображены вещественные векторы Визе для профиля “Саруу” для периодов 1 с, 10 с, 100 с, 1000 с. На коротких периодах индукционные стрелки над впадиной направлены хаотично, что говорит о высоком уровне приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Стрелки в пунктах над горами 1–4 направлены от проводящей впадины на ЮЮВ. С увеличением периода, стрелки в пунктах (5–12), расположенных во впадине, слаженно направлены от проводящего тела, связанного с озером Иссык-Куль и толщей осадков под ним, в Ю-ЮВ направлении. Возможно, кроме приповерхностного проводника, на периодах больше 10 с на поведение стрелок также оказывает влияние средне-коровый проводник, расположенный на глубинах около 10–20 км под

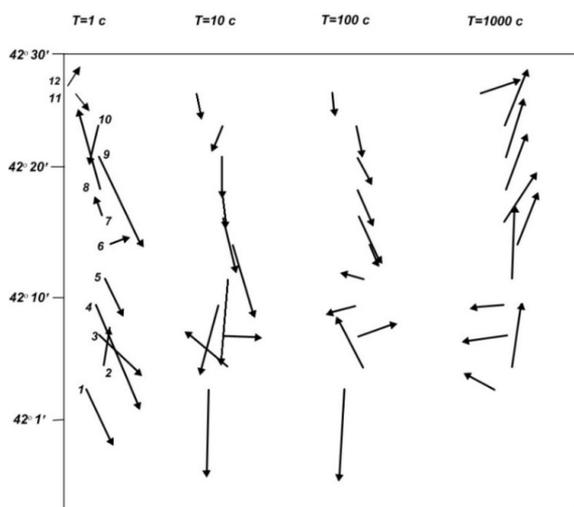


Рисунок 2 – Индукционные вектора Визе для точек профиля Саруу

оз. Иссык-Куль. Начиная с периода 100 с наблюдается разворот стрелок против часовой стрелки. На периоде 500 с индукционные стрелки уже ориентированы в С-СВ направлении. На этих периодах влияние проводящего комплекса впадины практически исчезает, и поведение векторов определяет региональный нижнекоровый проводящий слой, выявленный под Центральным Тянь-Шанем [1, 2]. Неоднородность этого слоя (увеличение его проводимости с севера на юг) объясняет направленность стрелок на самых низких частотах в С-СВ направлении.

**Двумерная сглаживающая инверсия** МТ данных по профилю “Саруу” была выполнена в программе Rodi-Maskie. Программа реализует метод нелинейных сопряженных градиентов, который пытается минимизировать целевую функцию, которая представляет собой сумму нормализованных невязок данных и сглаженности модели [8]. Компромисс между невязками данных и сглаженностью модели контролируется параметром регуляризации. Параметр задается вручную пользователем. Входными данными инверсии являются продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса по 12 пунктам наблюдения в интервале периодов от 0.01 до 1600 с. Сетка аппроксимационной модели состоит из 180 ячеек по горизонтали, разреженных по краям модели 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 сле-

дующие: модуль кажущегося сопротивления (ТЕ мода) – 100 %, модуль кажущегося сопротивления (ТМ мода) – 10 %, фаза импеданса (ТЕ мода) – 5 %, фаза импеданса (ТМ мода) – 5 %. В результате нескольких тестовых расчетов инверсии было выбрано значение параметра регуляризации равное 3. В результате выполнения 240 итераций получена модель, представленная на рисунке 4. Значение RMS-невязки составило 1.84.

В северной части профиля (пункты 6–12) в верхней части разреза выделяется зона пониженного сопротивления, расположенная от поверхности до глубины 13 км. По форме аномальная зона напоминает синклиналию складку с достаточно пологими углами падения. Эта часть профиля отвечает Иссык-Кульской осадочной впадине. На геологическом профиле этому участку соответствует синклиналию складка неоген-палеогенового возраста с неопределенной мощностью накоплений. Однако геоэлектрические данные недостоверны в определении мощности накоплений и из-за искажений кривых индукционными эффектами мощность кажется больше действительной. На крыльях складки недалеко от профиля бурением вскрыт палеозойский фундамент на глубинах около 4 км.

На глубинах от 15 км в северной части профиля отмечается крупная средне- и нижнекоровая аномалия, протягивающаяся на север к оз. Иссык-Куль. В южном направлении зона пониженного сопротивления круто уходит вниз, что соответствует Предтерекскому разлому согласно геологическим данным, он отделяет осадочную впадину от окружающего её срединного массива. Южная часть профиля отвечает хребту Терекской-Алатау, сложенному протерозойскими гранитоидами. В этой части профиля отмечается высокоомная аномальная зона, лишь на больших глубинах 30 км (пункты 3–4), переходящая в низкоомную зону, отмеченную в южной части профиля.

**Отражение глубинной структуры разломных зон и распределения сейсмичности в геоэлектрической модели.** Изученность разломных структур Тянь-Шаня явно недостаточна как ввиду сложного строения тектонической структуры исследуемого региона, так и в связи с перекрытием их мощным осадочным чехлом, о чем свидетельствуют разночтения в тектонических построениях [9, 10]. Геодинамические процессы, происходящие в земной коре и верхней мантии внутриконтинентального орогена, неизбежно приводят к появлению многочисленных разломных зон, которые сопровождаются областями повышенной трещиноватости (зоны динамического влияния разлома), при этом часть из них являются скрытыми. Однако

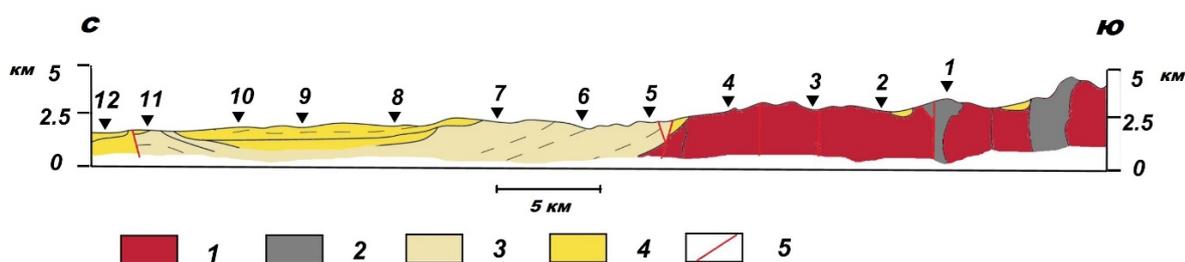


Рисунок 3 – Геологический разрез по профилю зондирования:

- 1 – гранитоиды; 2 – интрузивные массивы диоритов; 3 – глинистые отложения неогена – палеогена;  
4 – осадочный чехол впадины; 5 – предполагаемые и существующие разломные нарушения

эти зоны вследствие флюидной минерализации, сульфидизации и графитизации очень ярко проявляются в геоэлектрических моделях [11–14], что может быть использовано для установления геологической истории формирования и изучения геодинамических процессов региона, а также для выявления зон возможного рудопроявления и нефтегазоносных месторождений.

Установлено, что положение зон глубинных разломов или зон пониженного электросопротивления в геоэлектрических моделях зачастую соответствует границам крупных блоков (проницаемым для флюидов зонам) по геологическим данным [11–14]. Интересным представляется тот факт, что многие исследуемые проводящие структуры, приуроченные к разломным зонам [11, 12], имеют листрическую форму и их глубина проникновения ограничена коровым проводником, что в совокупности подтверждает представления о тектонической расслоенности Тянь-Шаня. В настоящей работе особое внимание уделено Предтерекскому разлому (рисунок 3), отделяющему осадочную впадину от окружающего её срединного массива. Согласно геологическим представлениям по этому разлому происходит сочленение впадины и хребта по линии длиной около 100 км. В геоэлектрической модели эта структура очень хорошо выражена как зона контакта под пунктом 7, круто падающая до глубин порядка 50 км.

По материалам каталога землетрясений Института сейсмологии НАН КР (ИС НАН КР) построено распределение сейсмичности вдоль профиля. При построении использовались события, произошедшие в период 1977–2015 гг. по объему пространства на расстоянии 10 км от профиля. На рисунке 4 отчетливо вырисовывается неоднородность пространственного распределения сейсмичности в районе профиля. Значительная концентрация землетрясений проявляется в зоне высокоомной аномалии на юге профиля, пространственно

эта сейсмоактивная зона приурочена к протерозойским гранитоидам. В нижней части проводящей верхнекоровой аномалии на севере профиля также отмечается зона повышенной концентрации землетрясений. Можно предположить, что это зона тяготеет к тем же гранитным массивам, что позволяет откартировать с её помощью положение фундамента осадочной впадины. Вероятно, истинная глубина положения подошвы осадочной толщи составляет около 6–7 км. Средне-нижнекоровой аномалии электропроводности на севере профиля соответствует зона пониженной сейсмической активности. Такое асейсмичное состояние среды возможно связано с некоторым размягчением пород под воздействием давления и температур. Однако наличие землетрясений на тех же глубинах в южной части профиля говорит об ином состоянии вещества, разной удаленности от расплавленных участков коры, от астеносферного слоя. На сегодняшний день анализ связи параметров сейсмоактивных зон с характеристиками геофизического поля электрических и скоростных неоднородностей для территории Тяньшанского региона был осуществлен целым рядом исследователей, например [2, 11, 14–18]. Авторами работы [17] показано, что большинство очагов коровых землетрясений Центрального Тянь-Шаня тяготеют к субвертикальным проводящим зонам, имитирующим флюидонасыщенные разломы.

В работе [14] установлено, что положение землетрясений энергетического класса  $K > 10$ , произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона, может быть объяснено геоэлектрическими особенностями земной коры: наличием высоких градиентов сопротивления, обусловленных высокоомными телами и зонами низких сопротивлений, и присутствием нижнекорового проводящего слоя и проводящего “канала”, соединяющего нижние и верхние структуры. Такая геоэлектрическая структура создает благоприятные

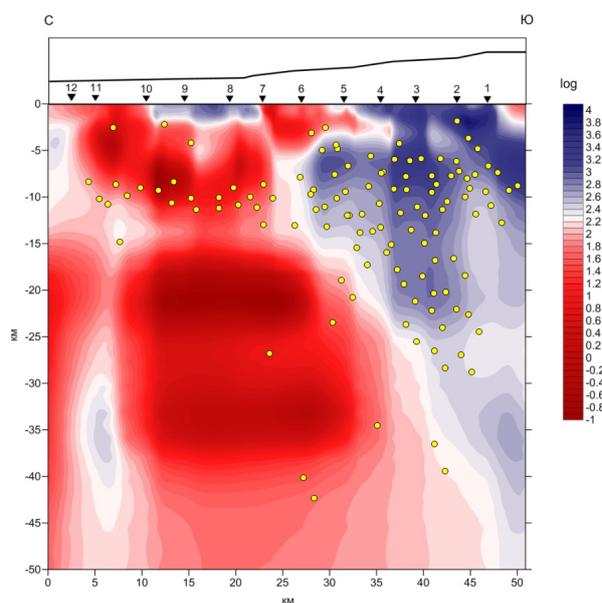


Рисунок 4 – Геоэлектрический разрез профиля “Саруу”. Шкала – десятичный логарифм  $\rho_k$  в Ом·м. Треугольниками показано расположение пунктов МТЗ. Круги – эпицентры землетрясений по данным ИС НАН КР

условия для диффузии флюида из нижнекорового горизонта к земной поверхности. По мнению авторов, низкое сопротивление верхнекорового проводника (глубины 7–12 км) связано с существованием трещиноватых, механически ослабленных зон, образовавшихся в результате деформаций хрупкой части разреза и заполненных водными флюидами. При этом высокая проводимость может быть обусловлена повышенной трещиноватостью среды только в том случае, если трещины связаны между собой и заполнены высокопроводящими водными растворами. Для объяснения природы проводящего объекта, выявленного на глубинах 15–40 км, по-видимому, следует рассматривать гипотезу частичного плавления вещества коры. Такую идею при рассмотрении природы слоев пониженной скорости сейсмических волн и повышенной электропроводности в земной коре Тянь-Шаня уже давно развивает академик А.Б. Бакиров, например, в работе [18].

Таким образом, с помощью метода МТЗ определено детальное глубинное строение земной коры южного борта Иссык-Кульской впадины. Построена геоэлектрическая модель по профилю “Саруу”. Определены геометрические и электрические характеристики областей пониженного сопротивления в полученном геоэлектрическом разрезе. При сопоставлении построенного геоэлектрического

разреза с распределением сейсмичности вблизи профиля “Саруу” отмечена значительная концентрация очагов землетрясений в зоне высокого сопротивления в южной горной части профиля. Эта сейсмоактивная зона пространственно приурочена к палеозойским гранитоидам. Напротив, в северной части профиля выявлена область пониженной сейсмической активности, отвечающая мощной средне-нижне-коровой проводящей зоне.

Такая взаимосвязь распределения сейсмичности и геоэлектрических характеристик разреза находит свое подтверждение в предложенном авторами объяснении физической природы выявленных проводящих структур, основанном на гипотезах флюидизации и частичного расплава пород земной коры.

Представленные исследования осуществляются в рамках выполнения Государственного задания ФГБУН ИС РАН (Тема IX.128 01552018-0001).

#### Литература

1. Трапезников Ю.А. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня / Ю.А. Трапезников, Е.В. Андреева, В.Ю. Баталев и др. // Физика Земли. 1997. № 1. С. 3–20.
2. Рыбин А.К. Глубинные электромагнитные зондирования в центральной части Киргизского Тянь-Шаня: автофер. дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.К. Рыбин. М., 2001. 24 с.
3. Сабитова Т.М. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня / Т.М. Сабитова, А.А. Адамова // Геология и Геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1543–1553.
4. Рёкер С. Земная кора и верхняя мантия Киргизского Тянь-Шаня по результатам предварительного анализа широкополосных сейсмических данных / С. Рёкер // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1554–1565.
5. Li Z. Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from the MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination / Z. Li, S. Roecker, B. Wei, H. Wang, G. Schelochkov, V. Bragin // Tectonophysics. 2009. 477(1-2). P. 49–57.
6. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System / Fox L. U.S. Patent № 6 191 587 B1, issued February 20, 2001.
7. Бердичевский М.Н. Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
8. Rodi W.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion / W.L. Rodi, R.L. Mackie // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174–187.

9. Садыбакасов И. Неотектоника центральной части Тянь-Шаня / И. Садыбакасов. Фрунзе: Илим, 1972. 118 с.
10. Макаров В.И. Новейшая тектоническая структура Тянь-Шаня / В.И. Макаров. М., 1977. 172 с.
11. Рыбин А.К. Структура земной коры по данным магнитотеллурических зондирований / А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.И. Макаров, И.В. Сафронов // В кн.: Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизийного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир, 2005. С. 79–96.
12. Баталева Е.А. Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части Кыргызского Тянь-Шаня и современная геодинамика: дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Е.А. Баталева. Новосибирск, 2005. 200 с.
13. Баталева Е.А. Проявление разломных структур в электромагнитных параметрах (для территории Центрального Тянь-Шаня) / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 9. С. 160–164.
14. Рыбин А.К. Современная геодинамическая активность земной коры Северного Тянь-Шаня и опасные геологические процессы / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, М.Г. Леонов, Е.С. Пржиляговский, К.Ч. Кожогулов, О.В. Никольская, Э.М. Мамыров // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 3. С. 157–163.
15. Баталева Е.А. Построение псевдорельефов крупнейших разломных структур для территории Центрального Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 3. С. 104–107.
16. Баталева Е.А. Взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Литосфера. 2015. № 5. С. 81–89.
17. Киссин И.Г. Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Кыргызского Тянь-Шаня / И.Г. Киссин, А.И. Рузайкин // Физика Земли. 1997. № 1. С. 21–29.
18. Бакиров А.Б. Признаки современного глубинного магматизма в Тянь-Шане / А.Б. Бакиров, О.М. Лесик, А.П. Лобанченко, Т.М. Сабитова // Геология и геофизика. 1996. № 12. С. 42–53.