

УДК 550.8.053

Коломейцев Д.В.

*Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научная станция
Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН)*

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Аннотация. В данной статье рассматривается использование системы активного электромагнитного мониторинга для наблюдения геодинамических процессов в земной коре на Бишкекском геодинамическом полигоне (БГП). Описывается методика сбора и обработки данных с помощью электроимпульсной установки ЭРГУ 600-2. Описан способ построения временных рядов кажущегося удельного электросопротивления с точки зрения постоянного тока. Представлен алгоритм обработки данных с использованием математических методов, включая системный анализ геодинамических процессов. Геоэлектрический разрез рассмотрен как динамическая система, для которой устанавливается причинно-следственная связь параметров земной коры и внешних воздействий. В работе предложен подход к анализу вариаций кажущихся сопротивлений для изучения динамики геодинамических процессов и изменений в земной коре.

Ключевые слова. Электроразведка; электромагнитный мониторинг земной коры; метод сопротивлений; лунно-солнечные приливы; временные ряды; современные геодинамические процессы; системный анализ.

ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН ЭЛЕКТРОМАГНИТТИК МОНИТОРИНГИНЕ НЕГИЗДЕЛГЕН ГЕОДИНАМИКАЛЫК ПРОЦЕССТЕРДИ СИСТЕМАЛЫК ТАЛДОО

Кыскача мазмуну. Бул макалада Бишкек геодинамикалык полигонунда (БГП) жер кыртышындагы геодинамикалык процесстерге байкоо жүргүзүү үчүн активдүү электромагниттик мониторинг системасын колдонуу каралат. Ал ЭРГУ 600-2 электроимпульс системасын колдонуу менен маалыматтарды чогултуу жана иштетүү методологиясын сүрөттөйт. Туруктуу ток боюнча көрүнүүчү каршылыктын убакыт катарларын түзүү ыкмасы сүрөттөлгөн. Геодинамикалык процесстердин системалык анализин камтыган математикалык методдорду колдонуу менен маалыматтарды иштетүү алгоритми берилген. Геоэлектрдик кесим динамикалык система катары каралат, ал үчүн жер кыртышынын параметрлери менен тышкы таасирлердин ортосундагы себеп-натыйжа байланышы орнотулган. Бул эмгек геодинамикалык процесстердин динамикасын жана жер кыртышындагы өзгөрүүлөрдү изилдөө үчүн көрүнгөн каршылыктын вариацияларын талдоо ыкмасын сунуштайт.

Негизги сөздөр. Электр чалгындоо; жер кыртышынын электромагниттик мониторинги; каршылык ыкмасы; Айдын толкундары; убакыт сериясы; заманбап геодинамикалык процесстер; системалык анализ.

SYSTEM ANALYSIS OF GEODYNAMIC PROCESSES BASED ON ELECTROMAGNETIC MONITORING OF THE EARTH'S CRUST

Abstract. This article discusses the use of an active electromagnetic monitoring system to observe geodynamic processes in the earth's crust at the Bishkek Geodynamic Test Site. This paper describes a method for collecting and processing data using the ERGU 600-2 electric pulse unit. A method for constructing time series of apparent resistivity in terms of direct current is also described. A data processing algorithm using mathematical methods, including systems analysis

of geodynamic processes, is presented. The geoelectric section is considered as a dynamic system for which a cause-and-effect relationship between crustal parameters and external influences is established. This paper proposes an approach to analyzing apparent resistivity variations for studying the dynamics of geodynamic processes and changes in the Earth's crust.

Keywords: electrical prospecting, electromagnetic monitoring of the Earth's crust, resistivity method, lunisolar tides, time series, modern geodynamic processes, systems analysis.

Введение

Важную роль в геофизических исследованиях играют электромагнитные зондирования, представляющие собой эффективные методы изучения параметров земной коры. Бишкекский геодинамический полигон (БГП), расположенный в 30 км к югу от столицы Кыргызстана, представляет собой уникальную площадку для таких исследований. На территории полигона развёрнута и действует система активного электромагнитного мониторинга напряжённо-деформированного состояния земной коры, целью которой является наблюдение изменений в геологической среде, их оценка и прогноз. За время наблюдений собран значительный объём данных мониторинга. Обработка и интерпретация этих данных представляет важную задачу для контроля динамических процессов, происходящих в земной коре. Потенциальным решением является применение системного анализа, при котором земная кора рассматривается как динамическая система. Один из возможных подходов к решению – системный анализ геодинамических процессов, который рассматривает геоэлектрические разрезы как динамические системы [1]. В этом контексте системный анализ включает в себя использование современных математических и вычислительных методов для обработки и интерпретации данных, полученных в результате работы системы мониторинга. В данной работе рассматриваются те современные геодинамические процессы, изменения которых отражаются в электромагнитных свойствах горной породы, а конкретно – в изменении кажущегося электросопротивления во времени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В составе системы активного электромагнитного мониторинга земной коры (рисунок 1), действующей на территории БГП, используется электроимпульсная установка ЭРГУ 600-2. Она, преобразуя энергию промышленной сети в биполярные импульсы задаваемой длительности, служит источником тока возбуждения. Зондирующим сигналом является периодическая последовательность импульсов тока амплитудой до 600 А и длительностью 5 с. Этот сигнал подаётся в диполь – заземлённый на концах кабель длиной 4.2 км, ориентированный с севера на юг. Контроль амплитуды тока и напряжения и запуск зондирований осуществляется токовой измерительной станцией ТИС-3. Приёмная часть системы активного мониторинга состоит из шести стационарных пунктов, расположение которых было выбрано для мониторинга по результатам наблюдений, проведённых с помощью различных методов [2] с учётом информации о глубинном (20-25 км) строении полигона. Во время зондирования на измерительных диполях возникает разность потенциалов, позволяющая изучить переходные процессы, происходящие в земной коре. Регистрация отклика обеспечивается типовой приёмной станцией ИС-2. Запуск зондирований и регистраций синхронизированы благодаря GPS приёмникам.

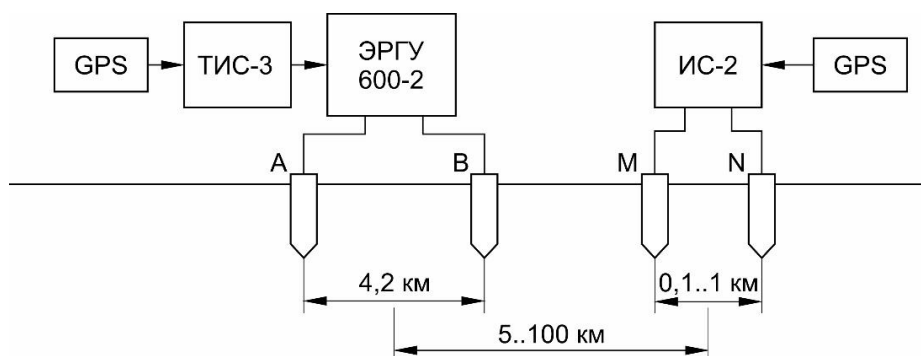


Рисунок 1. Структура системы электромагнитного мониторинга (метод ЗСД) в ИС РАН. ЭРГУ 600-2 – электроразведочная генераторная установка, ТИС-3 – токовая измерительная станция, ИС-2 – измерительная станция, GPS – приёмник системы глобального позиционирования, АВ – питающий диполь, МН – приёмный диполь.

Обработка и хранение данных обеспечивается специальными программами, разработанными в ИС РАН. С помощью программы TISViewer [3] производится запуск и настройка сеансов и осуществляется обработка сигналов тока и напряжения на питающем диполе. Ключевым параметром, вычисляемым программой – среднее значение зондирующего тока в установившемся режиме I_0 . Первичный сигнал обрабатывается алгоритмом синхронного весового накопления [2]. На интервале длительностью 1 с в конце накопленного импульса, показанного на рисунке 2 (а), вычисляется I_0 .

Программа ISViewer [4] осуществляет обработку сигналов с приёмных станций. Первичный сигнал, зарегистрированный ИС-2, также подвергается синхронному весовому накоплению. Производится динамическая фильтрация полученного накопленного сигнала [5]. Формируется логарифмическая шкала временных интервалов, внутри которых вычисляется среднее значение амплитуды накопленного сигнала на середине интервала. Длительность интервалов усреднения возрастает от 6.25 мс до 0.33 с и количество таких интервалов составляет 44 (рисунок 2 (б)). Главный результат, получаемый после обработки – кривая кажущегося сопротивления, рассчитываемая по формуле:

$$\rho_{\tau}(t_j) = K \frac{M_j}{I_0}, \quad (1)$$

где $\rho_{\tau}(t_j)$ – кажущееся сопротивление в текущем временном интервале, K – геометрический коэффициент установки, зависящий от взаимного расположения диполей, M_j – среднее значение амплитуды накопленного сигнала в текущем временном интервале, I_0 – значение тока в установившемся режиме.

Известно, что при проведении измерений по методу сопротивлений возможно использование не постоянного тока, а переменного с низкой частотой [7]. Это возможно, потому что в ближней зоне распределение переменного электромагнитного поля не зависит от частоты и совпадает с распределением поля постоянного тока. В современной аппаратуре частотный диапазон зондирующих импульсов составляет от 0 до 10 Гц [8]. На графиках, изображённых на рисунке 3, видно, что на поздних временах зондирующий ток и напряжение на приёмном диполе устанавливаются. Это позволяет рассмотреть эту ситуацию с позиции постоянного электрического тока. Для каждого сеанса зондирования берётся среднее значение амплитуды накопленного сигнала на последнем интервале ΔU и соответствующее среднее значение зондирующего тока I . Таким образом, для расчёта кажущегося сопротивления методом сопротивлений получается следующее выражение:

$$\rho_{\kappa} = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (2)$$

где K – геометрический коэффициент установки, зависящий от расстояний между точечными заземлениями [6]. Коэффициенты K в формулах (1) и (2) рассчитываются

идентично. Из полученных значений кажущегося сопротивления составляется временной ряд для каждого стационарного измерительного пункта. Так как на некоторых пунктах размещаются диполи, ориентированные по сторонам света, количество временных рядов для шести стационаров составляет 8.

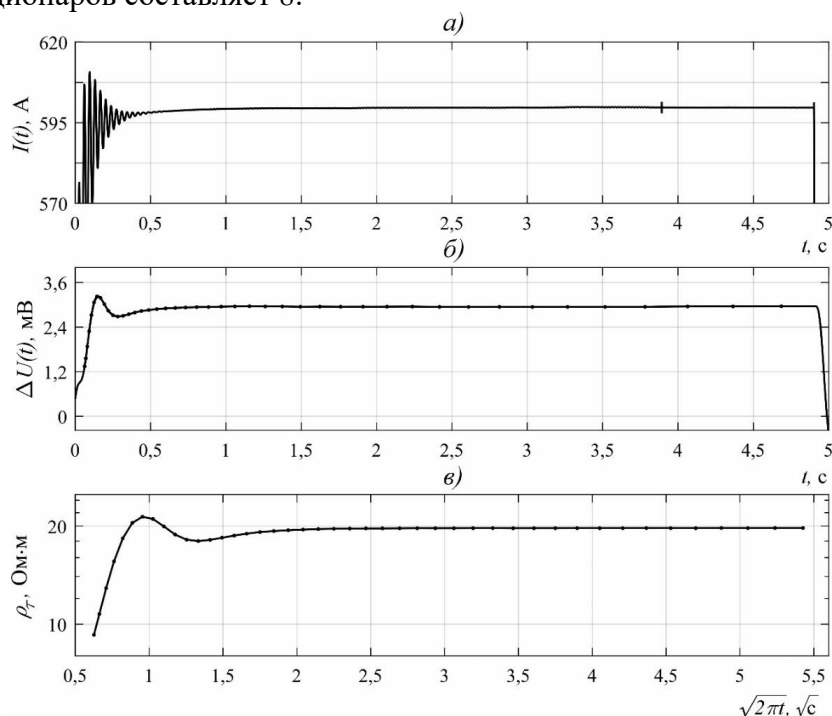


Рисунок 2. Графики сигналов: а) – накопленный сигнал зондирующего тока на излучающем диполе; б) – напряжение на приёмном диполе с отмеченными средними значениями амплитуды после динамической фильтрации; в) – кривая кажущегося сопротивления.

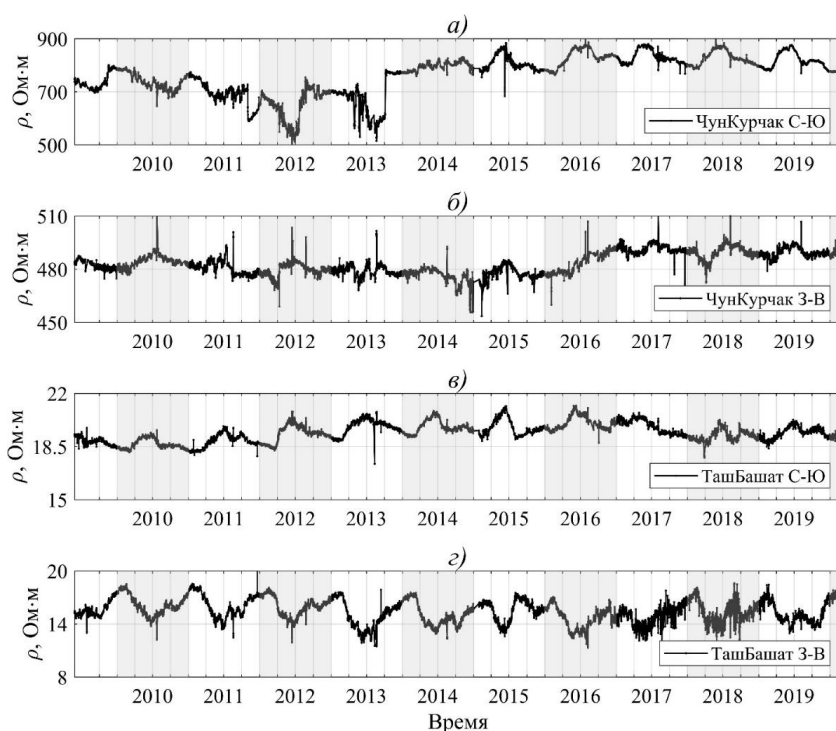


Рисунок 3. Графики вариации кажущегося сопротивления на стационарных пунктах Чункурчак: (а) – диполь «север-юг» и б) – диполь «запад-восток») и Таш-Башат: (в) – диполь «север-юг» и г) – диполь «запад-восток»). Серым выделены года.

По данным, взятым за период с 2009 г. по 2020 г., хорошо видны периодические изменения, соответствующие изменению времён года. Примечательно, что на диполях (особенно хорошо заметно на измерительном пункте Таш-Башат), ориентированных перпендикулярно кривые вариаций кажущегося сопротивления, связанные с сезонными изменениями, меняются противофазно, т.е. при увеличении кажущегося сопротивления на диполе север-юг, значения на диполе запад-восток, наоборот, уменьшаются.

Области литосферы подвергаются внешним воздействиям и под их влиянием происходят изменения внутренней структуры, отражающиеся в изменении параметров геоэлектрического разреза. Изменяющиеся во времени кажущееся сопротивление, измеренные на разнесенных стационарных пунктах, образуют систему как совокупность отдельных частей, связанных друг с другом. Функции времени, являющиеся полученными вариациями кажущегося сопротивления, можно свести в вектор-функцию $\mathbf{X}(t)$. В интервалы времени Δt , когда изменения системы незначительны, существует нижеуказанная линейная связь:

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = ([1] + \Delta t B)\mathbf{X}(t), \quad (3)$$

где: B – матрица, характеризующая изучаемую систему, $[1]$ – единичная матрица соответствующей размерности. Изменение системы во времени будет определяться изменением матрицы B . В этом случае за всё время наблюдений геодинамических процессов матрица B будет функцией времени $B=B(t)$. То есть, B является «снимком», на котором запечатлена исследуемая система в момент времени, определяемый шагом дискретизации измерений параметров системы. Формула (3) применяется для построения моделей динамических процессов, и сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Вектор современных геодинамических процессов характеризует энергетику геодинамического процесса в целом и выражается формулой $\mathbf{G} = \sum_{i=1}^m d_i \mathbf{V}_i$, где d_i – собственное значение матрицы B , $\mathbf{V}_i$ – собственный вектор матрицы B , m – число функций времени (отсчётов). Отношение $\Delta E_i = |\mathbf{G}_i|/|\mathbf{G}_{i-1}|$ для двух векторов, полученных в моменты времени t_i и t_{i-1} , показывает изменение мощности геодинамического процесса. Скалярное произведение векторов $\mathbf{G}_i \mathbf{G}_{i-1} = |\mathbf{G}_i|/|\mathbf{G}_{i-1}| \cos(\Delta\phi_i)$ отражает изменение геодинамического процесса во времени, а точнее изменение направления этого процесса. Разность $\Delta\phi_i = \phi_i - \phi_{i-1}$ указывает на изменение структурного строения геодинамического процесса. Вследствие внешнего воздействия на систему происходит изменение энергетики ΔE , а затем изменение структуры системы $\Delta\phi$.

Режим работы системы активного электромагнитного мониторинга заключается в ежедневных повторяющихся запусках зондирования и регистраций на измерительных пунктах только в дневное время. Поэтому интервалы времени на вариационных рядах неравномерны. Для дальнейшего анализа данные аппроксимированы полиномом 20 степени. Расчёт осуществляется с разделением временных рядов на 50 интервалов. На текущем интервале рассчитываются матрица B и вектор геодинамических процессов $\mathbf{G}$. Далее берётся следующий интервал и также вычисляются B и $\mathbf{G}$. Таким образом получается вектор современных геодинамических процессов на 50 интервалах.

По восьми вариационным рядам рассчитана квадратная матрица B с размером 8. Результаты вычисления компонент вектора современных геодинамических процессов представлен на рисунке 4. На осреднённых по 10 точкам графиках отношения ΔE и разности $\Delta\phi$, изображенных на рисунке 5, видно, что энергетика системы изменилась.

Функция взаимной корреляции (рисунок 6) рассчитана на интервале в 50 суток. Выделяются области, где формируется динамическая система и видно изменение её внутренней энергии. Более детальный анализ осложнён тем, что зондирования и измерение отклика на всех стационарах проводятся с перерывами.

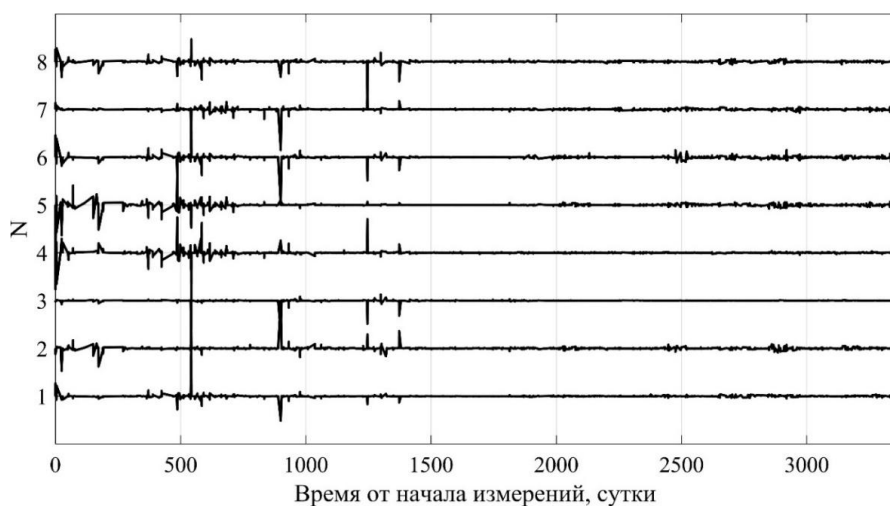


Рисунок 4. Компоненты вектора современных геодинамических процессов.

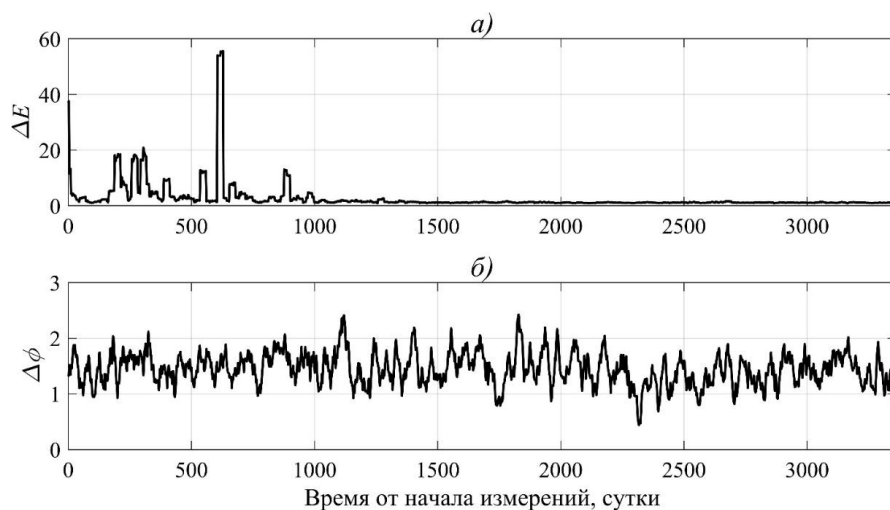


Рисунок 5. Графики модуля отношений вектора современных геодинамических процессов ΔE и разности фаз $\Delta \phi$.

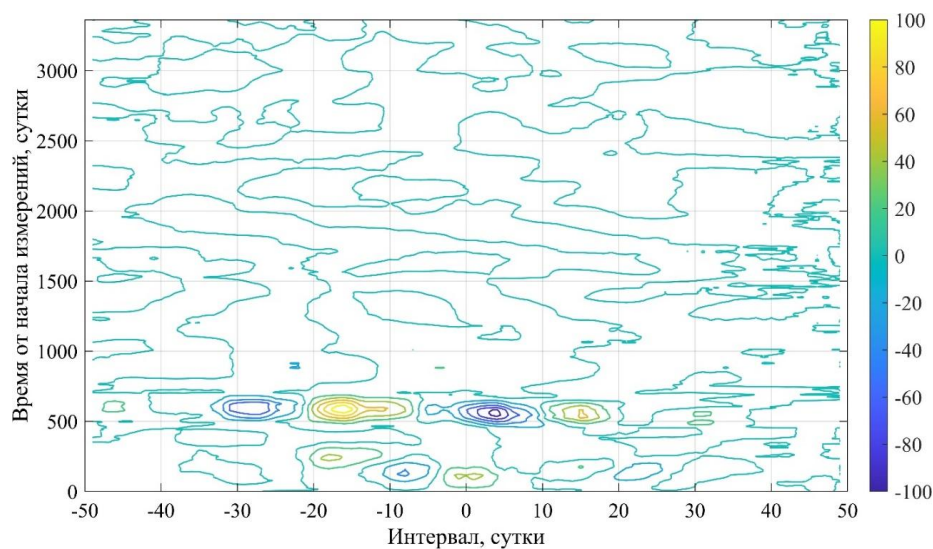


Рисунок 6. Функция взаимной корреляции между модулем отношений вектора современных геодинамических процессов ΔE и разности фаз $\Delta \phi$

Выводы

Таким образом, в результате обработки по указанному выше алгоритму выделены две области, где выполняется представления о причинно-следственной связи между энергией системы и её структурой. Собран большой фактический материал за длительный период времени работы ЭРГУ. Предложенный подход к анализу геодинамических процессов с использованием системного анализа может быть эффективно применён для комплексного исследования современных геодинамических процессов, включая анализ различных физических полей. Этот подход позволяет решать несколько ключевых вопросов: например, какова должна быть продолжительность полевых исследований для изучения конкретного геодинамического процесса, какой интервал времени следует использовать для дискретных измерений, а также какие точки в пространстве необходимо исследовать для решения задач мониторинга современных геодинамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров П.Н., Модин И.Н. Системный подход к анализу данных электрометрического мониторинга// инженерные изыскания №2 2015г. С 26-34
2. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / Отв. ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М.: Наука, 1993. 158 с.
3. Мясников Д.С., Бобровский В.В. Программа регистрации сигналов для электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2014611577. Дата регистрации: 06.02.2014 г.
4. Плисовицкая Е.А., Мясников Д.С. Программа обработки сигналов для электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2013612292. Дата регистрации: 20.02.2013 г.
5. Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А., Лисимов М.О. Технология активного электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах северного Тянь-Шаня // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102, № 2/3, с.40–62.
6. Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л., Электроразведка. М.: Недра, 1982 г.
7. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского из-во моск. универа 1994
8. Электроразведка. Под ред. В.К. Хмелевского, М. 2005

Рецензент: д. ф.-м.н., к.г.-м.н. Александров П.Н.