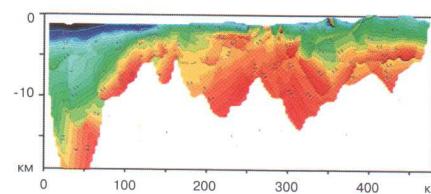
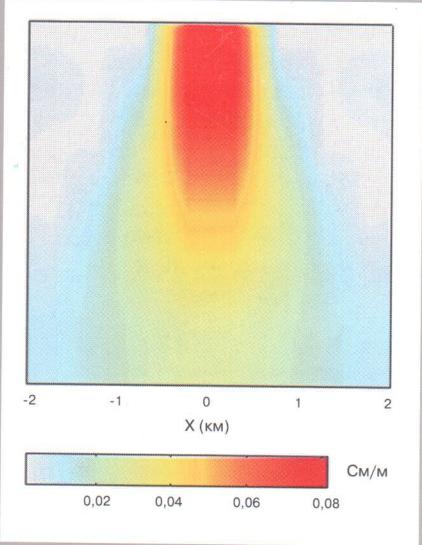
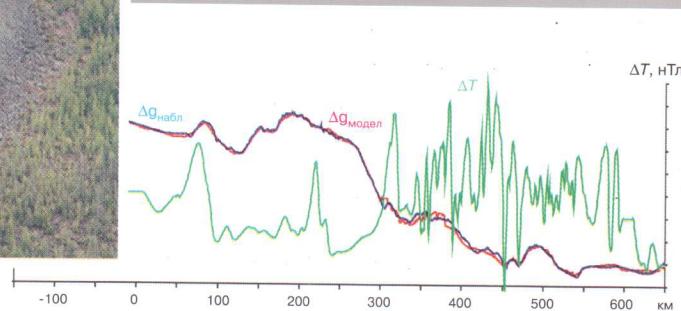
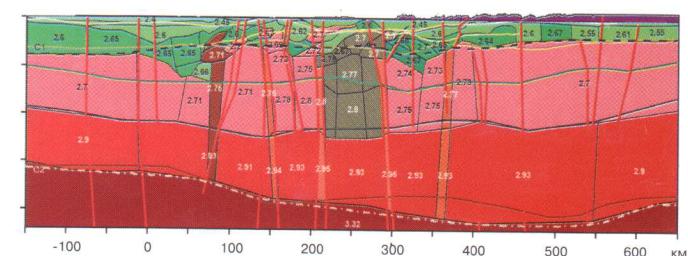


2.2011

Геофизика



Патомский кратер

Сибирская платформа
Норильско-Верещагинский rift

Решение обратной задачи
с использованием
уравновешивающего критерия

Сейсмогравитационная модель земной коры
по профилю КМПВ Варигэяха - Аян

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ АМТ-МВЗ НА ПАТОМСКОМ КРАТЕРЕ

С. М. Миронов, О. Ингеров, А. С. Егоров,
Е. Ю. Ермолин, Р. А. Суханов

АННОТАЦИЯ. Патомский кратер, расположенный в труднодоступной части Байкало-Патомского нагорья (восток Иркутской области), привлекает внимание геологов и геофизиков со времени его открытия в конце 40-х годов прошлого столетия. В результате проведения разнообразных исследований было выдвинуто несколько гипотез образования этой необычной структуры. Рассматривались импактная, эндогенная и ряд других моделей её формирования, однако ни одна из них до настоящего времени не получила достаточного фактического обоснования. Новая попытка исследовать природу этого геологического объекта была предпринята в августе 2010 г. объединённой геолого-геофизической экспедицией, включавшей специалистов из ведущих научных центров Москвы, Санкт-Петербурга, Иркутска и др. В комплексе геофизических методов ведущую роль играли электромагнитные исследования АМТЗ и МТЗ. В данной работе представлены предварительные результаты этих электроразведочных работ.

Ключевые слова: Патомский кратер, гипотеза образования, электромагнитные исследования.

ABSTRACT. The Patomsky crater located in the difficult to access part of Baikal-Patomsky upland (east of Irkutsk region) is attracting attention of geologists and geophysicists since it has been discovered in 40th years of previous century. According to the results of previous investigations, several hypotheses of this unusual structure have been advanced. The impacts, endogenous and number of other models were considered, but no one of them was sufficiently proved. The new attempt to shed the light on origin of this geological object was made in August, 2010 by joint geological and geophysical expedition, which included experts from Moscow, Saint Petersburg and Irkutsk. The AMT and MT electromagnetic methods played the leading role in investigations. The preliminary results of these electromagnetic surveys are considered in this article.

Key words: Patomsky crater, hypotheses, electromagnetic surveys.

Введение

Вопрос о природе происхождения Патомского кратера, расположенного в труднодоступной восточной части Иркутской области, уже более 60 лет занимает умы ведущих специалистов, изучающих этот интереснейший регион. Этот геологический объект, дискордантно расположенный относительно вмещающих геологических структур, имеет аномальный визуальный облик и контрастное проявление на космических снимках (рис. 1).

Впервые Патомский кратер был обнаружен в 1949 г. при проведении геолого-съёмочных работ геологом В. В. Колпаковым [5]. К настоящему моменту разработано и широко обсуждается множество гипотез формирования Патомского кратера: импактная, эндогенная и ряд других моделей. Однако ни одна из них до настоящего времени не получила достаточного фактического обоснования.

В 2008 г. тематическим коллективом Иркутского электроразведочного предприятия под руководством проф. А. В. Поспелова было отработано несколько точек АМТЗ в непосредственной близости от Патомского кратера. В результате этих съёмок были получены материалы АМТЗ высокого качества. Однако из-за сложных условий местности авторы не сумели установить

магнитные датчики для измерения вертикальной магнитной компоненты электромагнитного (ЕМ) поля. В результате не были получены магнитовариационные данные [7] (вектор индукции, типпер), наиболее информативные при изучении горизонтально неоднородных структур. Тем не менее эти работы дали ценную информацию о геоэлектрическом разрезе и сыграли решающую роль в успешном проектировании ЕМ исследований 2010 г.

В августе 2010 г. С. М. Мироновым и группой компании "Метрополь" была организованна комплексная геолого-геофизическая экспедиция, задачей которой было получение надёжных фактических материалов для построения модели формирования Патомского кратера.

В составе комплекса геофизических методов исследований экспедиции 2010 г. ведущую роль играли электроразведочные работы методами магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТ), выполненные вдоль линии профиля, пересекающего Патомский кратер. Работы выполнены геофизиками Санкт-Петербургского государственного горного института - Технического университета (СПГГИ-ТУ) с использованием высокопроизводительной аппаратуры канадских компаний "Феникс Джоффизикс" и "АГКОС".

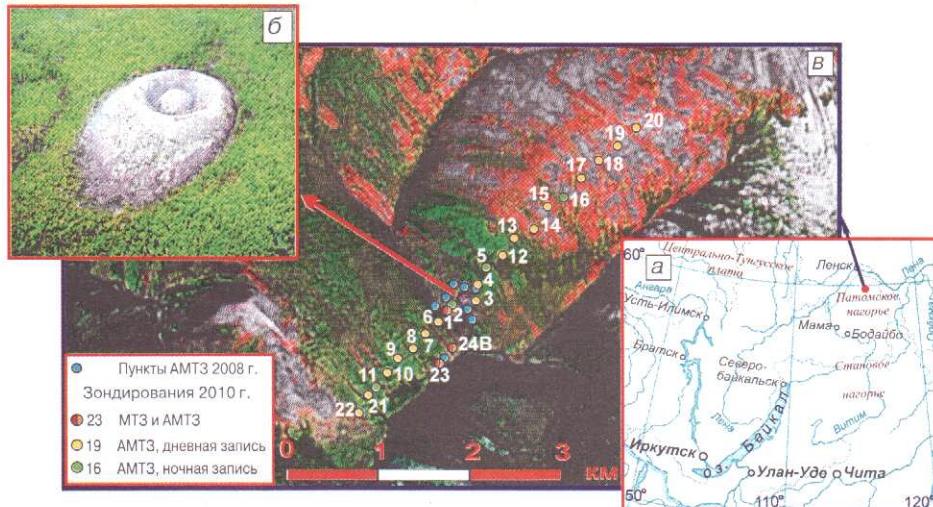


Рис. 1. Географическое положение (а) и внешний облик (б) Патомского кратера: на фрагменте космического снимка (в) показана схема расположения пунктов МТЗ-АМТ

В статье изложены особенности методики выполненных полевых работ и предварительные результаты интерпретации полученных данных.

Геолого-геофизическая модель района Патомского кратера

Патомский кратер представляет собой кольцевую структуру центрального типа с насыпным конусом. Размеры основания конуса в проекции на горизонтальную плоскость составляют 160×130 м. Диаметр окаймляющего воронку кольцевого вала 80 м, а глубина воронки - 12 - 15 м. Диаметр основания центральной горки 34 м [1]. Дендрохронологические исследования позволяют оценить возраст формирования осьпи раннего вала кратера интервалом времени от 250 до 300 лет [3].

Особенность геолого-структурной позиции Патомского кратера состоит в том, что он расположен на удалении от очагов современной вулканической активности.

Для выбора оптимальной методики проведения полевых работ была составлена предварительная трёхмерная геоэлектрическая модель района исследований (рис. 2). В основу модели были положены геологическая карта масштаба 1 : 200 000 и данные АМТЗ 2008 г.

Кратер приурочен к юго-западному крылу синклинальной складки северо-западного простирания. На земной поверхности в районе кратера установлено погружение геологических контактов в юго-западном направлении под углом, близким к 45° . Северо-восточный фланг профиля располагается вблизи крупного разрывного нарушения северо-западного простирания, влияние которого на результаты МТЗ и АМТЗ может быть весьма значительным, т. к. зоны разрывных нарушений, как правило, обладают пониженным удельным электрическим сопротивлением. Какой-либо отчётливой пространственно-генетической связи кратера с особенностями морфологии складчатых структур или с расположением разрывных нарушений не установлено.

Вмещающими породами для Патомской структуры являются метаморфизованные терригенно-карбонатные отложения раннепротерозойского возраста, характеризующиеся повышенными значениями удельного

сопротивления ($1000 - 100 000$ Ом·м). На фоне высокоомного разреза выделяется значительное число относительно тонких прослоев (мощностью до 200 м) углифицированных метаморфизованных осадков, удельное сопротивление которых может снижаться до единиц ом-метров.

Следует отметить, что на кривых АМТЗ 2008 г. отмечались существенные различия в значениях кажущегося сопротивления вкрест и вдоль простирия пород (эффект расхождения [2]). Кроме того, отмечены искажения кривых фазы импеданса, которые выходили за пределы общепринятых диапазонов значений этого параметра, что может свидетельствовать о наличии вблизи точек зондирования вертикального контакта пород резко отличных по геоэлектрическим свойствам [2]. Последний факт крайне осложняет проведение двумерной инверсии АМТ данных.

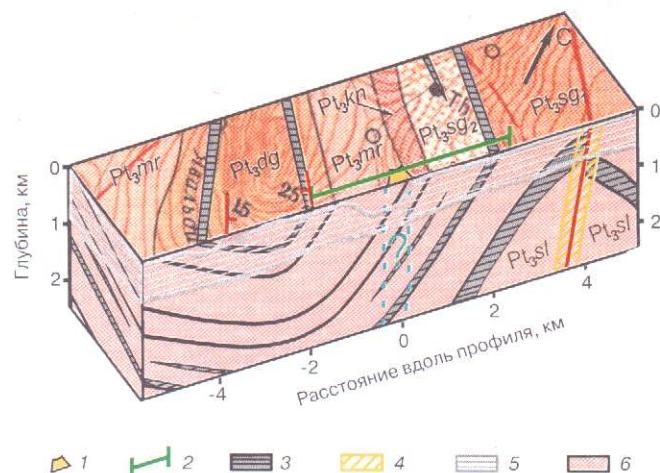


Рис. 2. Предварительная геоэлектрическая модель района Патомского кратера, составленная по априорным данным и геологической карте:
1 - положение Патомского кратера; 2 - линия профиля МТЗ-АМТ; 3 - прослои углистых сланцев с низким (до единиц ом-метров) удельным электрическим сопротивлением; 4 - зоны разломов или тектонических контактов; 5 - предположительно зона многолетнемёрзлых пород; 6 - вмещающие карбонатно-терригенные высоковоомные ($1000 - 100 000$ Ом·м) породы

Как следует из анализа геологического строения и опыта предшествующих исследований, район характеризуется сложным анизотропным строением. В этих условиях необходимо учитывать не только влияние объектов, пересекаемых профилем, но и возможные искажения, вызванные объектами, расположенными вне сечения профиля. Для оценки влияния боковых неоднородностей нами было предусмотрено измерение вертикальной компоненты электромагнитного (ЕМ) поля, что позволяет одновременно со съёмкой МТЗ-АМТ выполнить магнитовариационное зондирование (МВЗ).

Ещё одной методической проблемой, которую приходится решать в данном регионе при выполнении работ методом МТЗ-АМТ, является наличие значительных статических искажений кривых кажущегося сопротивления, вызванных высокой геоэлектрической неоднородностью приповерхностной части геологического разреза.

Методика полевых работ и обработки материалов

С учётом параметров охарактеризованной выше модели геоэлектрической среды района исследований, возможных методических трудностей и краткосрочности экспедиции был отработан один профиль АМТ-МВЗ, заданный вкрест простирации геологических структур района исследований: азимут простирации - 45°, длина профиля - 5 км, шаг наблюдений - 200 м.

Магнитотеллурические и магнитовариационные методы (АМТЗ, МТЗ и МВЗ) основаны на измерениях естественного ЕМ поля Земли в диапазоне частот от долей до нескольких тысяч герц [2, 7].

Работы выполнялись с использованием современных аппаратурных комплексов канадских компаний "Феникс Джоефизикс" и "АГКОС". Полевые записи по технологии АМТЗ, МТЗ и МВЗ выполнялись многофункциональными широкодиапазонными регистраторами MTU-5a (пятое поколение GPS синхронизированной, многофункциональной электrorазведочной аппаратуры [4, 6]). Преобразователями напряженности двух компонент (E_x , E_y) ЕМ- поля служили две заземлённые электрические линии MN длиной 30 м каждая. Преобразователями трёх магнитных компонент (H_x , H_y , H_z) естественного ЕМ поля служили индукционные магнитные датчики MTC-30 (АМТЗ) и MTC-50 (МТЗ). При-

менялась крестообразная установка наблюдений с центральным заземлённым электродом (рис. 3, a).

В отличие от традиционной схемы выполнения работ АМТЗ, предусматривающей закапывание магнитных датчиков в грунт (для защиты от ветровых помех и терmostабилизации датчиков), авторами применялась более прогрессивная схема установки магнитных датчиков на прецизионных треногах (см. рис. 3, б, в). Применение прецизионных треног позволяет устанавливать магнитные датчики на любом грунте, в том числе на склонах до 45°, обеспечивать высокую точность ориентировки датчиков, их ветрозащиту и термоизоляцию, а также существенно сократить подготовительно-заключительные операции на пунктах наблюдений. Как дневные, так и ночные наблюдения выполнялись по схеме с постоянным базовым пунктом (как для МТЗ, так и АМТЗ) [8]. Такая методика позволила эффективно отсеивать помехи на стадии обработки материалов и обеспечивать снижение погрешностей определения функций отклика (не более 1,9% для кажущегося сопротивления, 2,1° для фазы импеданса, 0,025 для амплитуды типпера и индукционных векторов и 6,5° для фазы типпера). За четыре рабочих дня выполнены 23 физических наблюдения на профиле и 1 наблюдение на базовом пункте. Из их числа 21 точка (17 дневных и 4 ночных наблюдений) отработана методом АМТЗ и 3 точки методами МТЗ-АМТ. Длительность дневных записей АМТЗ составляла 30 - 60 мин, ночных АМТЗ и МТЗ - 18 ч. На всех 24 пунктах выполнялась регистрация вертикальной магнитной компоненты поля H_z . Таким образом, было выполнено 24 точки МВЗ.

Первичная обработка полевых записей (временных рядов и табличных файлов) выполнялась в полевом лагере. Целью такой обработки являлся контроль качества полевых материалов. Углублённая обработка проводилась по завершению полевого периода в Санкт-Петербурге. Для первичной обработки использовался комплекс программ SSMT-2000, разработанный компанией "Феникс Джоефизикс" (автор Дж. Грэхэм).

Обработка данных включала вычисление по полевым записям временных рядов спектров сигналов пяти каналов с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Полученные спектры использовались для вычисления откликов среды: матриц тензора импеданса (Z) и вектора индукции (C) как функций частоты. При

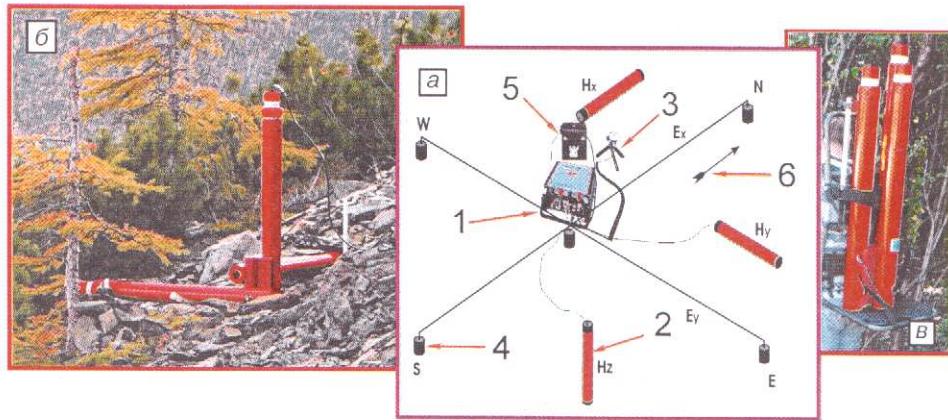


Рис. 3. Схема расстановки магнитотеллурической станции МТЗ-АМТ:

a - схема установки для полевых наблюдений методами МТЗ-АМТ и МВЗ; б - общий вид магнитных датчиков для АМТЗ, установленных на прецизионной треноге; в - один из способов транспортировки треноги и магнитных датчиков; 1 - станция MTU-5A; 2 - магнитные датчики; 3 - GPS антенна; 4 - неполяризующиеся электроды; 5 - аккумуляторная батарея; 6 - азимут установки

этом применялись робастные процедуры и весовое оценивание, пропорциональные когерентности электрических и ортогональных им магнитных полей, когерентности магнитных полей в точке профиля относительно магнитных полей в постоянном базовом пункте, удалённости каждого среднего решения от среднего значения по каждой функции.

Редактирование и построение сплайнов кривых кажущегося сопротивления, дополнительного импеданса, фазы импеданса, частотных характеристик модуля и фазы типпера, действительных и мнимых частей компонент вектора индукции осуществлялось с помощью программы SSMTBASE (автор А. Элбакидзе). Особенности обработки тензора импеданса на данном этапе: 1) совместное использование для различных диапазонов частот импедансных и адmittансных решений [11]; 2) использование при редактировании кривых кажущегося сопротивления и дополнительного импеданса преобразования Гильберта [2] и реализация процедуры амплитудно-фазовой коррекции как главного, так и дополнительного импеданса.

Две вышеперечисленные процедуры обработки, в течение многих лет успешно применяемые в российской компании "ЕМГЕО" (Центр "ЭМИ"), позволили отбраковать недостоверные решения.

Результаты обработки и редакции (сплайны кривых кажущегося сопротивления, дополнительного импеданса, фазы импеданса, реальной и мнимой части типпера и др.) сохранялись в виде табличных файлов с расширением EDI (международный стандарт SEG), которые в дальнейшем использовались для качественного анализа геологической ситуации, а также для 1D- и 2D-инверсии данных.

Анализ функций отклика

Анализ данных АМТ-МВП осуществлялся в программном комплексе WinGLink (Geosystem Ltd.), в настоящий момент являющимся одним из ведущих при обработке и интерпретации геофизических данных.

Функциями отклика среды на ЕМ воздействие в методах МТЗ и АМТ являются частотные характеристики тензора импеданса Z , по которым производится расчёт частотных зависимостей кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Этап анализа этих данных включает построение псевдоразрезов. Далее строятся амплитудные полярные диаграммы (АПД) основных и дополнительных компонент тензора импеданса. Совокупность этих данных позволяет оценить взаимное расположение в плане и на глубине различных по геоэлектрическим свойствам блоков пород, определить ориентировку геологических структур, оценить размерность среды и выбрать наиболее подходящие алгоритмы инверсии.

В методе МВЗ функциями отклика являются частотные характеристики модуля и фазы типпера (T) и реальные и мнимые индукционные векторы (W) на разных частотах, а также частотные характеристики их компонент (C_i) [2, 7]. Важными свойствами магнито-вариационных функций отклика является их чувствительность только к наличию горизонтальных неоднородностей, т. е. в однородной или горизонтально-слоистой среде эти функции равны 0. Кроме этого, в конвенции Паркинсона [2, 7] направление вектора реальной части индукции указывает на эпицентр электропроводящей неоднородности.

Вертикальные разрезы типпера могут дать информацию о параметрах горизонтальных геоэлектрических неоднородностей: по частоте максимумов аномалий можно определить относительную суммарную проводимость сечения двумерных аномальных объектов, по амплитуде и расстоянию между экстремумами - глубину залегания тел [9], по форме аномалии - угол наклона [10].

Анализ тензора импеданса. Полярные диаграммы основных (чёрный цвет) и дополнительных (красный цвет) импедансов для ряда частот приведены на рис. 4.

На картах АПД наблюдается устойчивая тенденция ориентировки больших осей полярных диаграмм основных импедансов по направлению профиля наблюдений. Эта тенденция сохраняется на всех приведённых частотах. На частотах 3000, 300 и 100 Гц для большинства пикетов АПД главных компонент приобретают форму овала, а АПД дополнительных импедансов имеют четыре лепестка, что свидетельствует о двумерном характере МТ- поля [2] для данного диапазона частот.

Основываясь на геологических данных и анализе АПД основных и дополнительных импедансов, было установлено, что азимут ориентировки диаграмм -45 (315) $^{\circ}$ соответствует ТЕ mode (направлена вдоль простирации пород и вкрест большой оси АПД основных импедансов), а ТМ mode - азимут 45 $^{\circ}$ (направлена вкрест простирации пород и вдоль малой оси АПД основных импедансов).

Рассматривая характер МТ- поля в диапазоне частот от 30 Гц и ниже, следует отметить последовательное увеличение размера АПД дополнительных импедансов с уменьшением частоты. При этом полярные диаграммы дополнительных импедансов имеют не четырехлепестковую форму, характерную для двумерной среды, а в подавляющем большинстве двухлепестковую форму, с большой осью, расположенной под углом, близким к 90 градусам к большой оси АПД основных импедансов. При этом размеры АПД дополнительных импедансов на относительно низких частотах достигают, а иногда и превышают, размеры АПД основных импедансов. Такое поведение свидетельствует о существенной неоднородности среды, которая по своим свойствам гораздо ближе к трёхмерной ситуации.

На рис. 5 приведены типичные кривые АМТЗ и частотные характеристики типпера для юго-западной, центральной и северо-восточной частей профиля.

В юго-западной части профиля в короткопериодном диапазоне значения удельного сопротивления составляют в среднем 1000 Ом·м (верхние 300 м разреза). После короткой восходящей ветви, свидетельствующей о некотором повышении сопротивления с глубиной, следуют длинные нисходящие ветви, отражающие суммарное влияние прослоев, обогащенных углистым веществом; в районе 0,1 с (10 Гц) наблюдается максимум или перегиб, отражающий некоторое по-

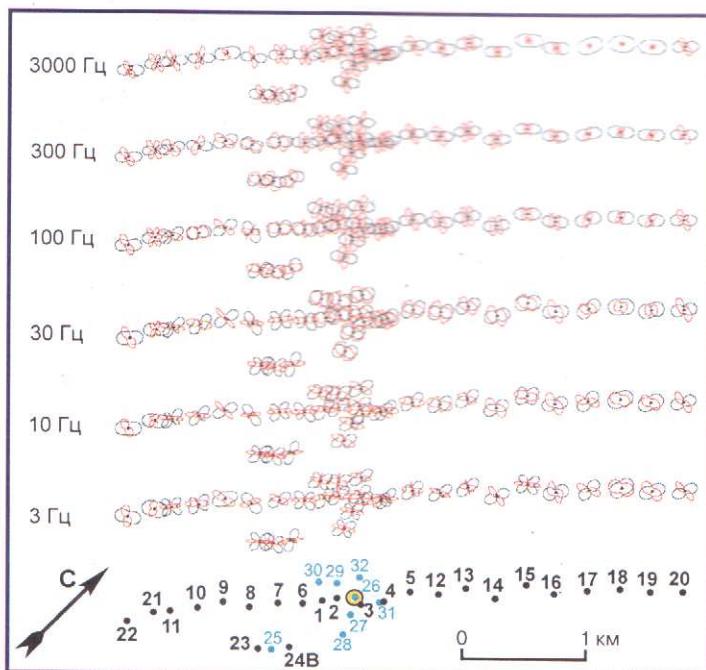


Рис. 4. Карты импедансных полярных диаграмм для шести частот:
чёрный цвет - полярные диаграммы для основных импедансов, красный - дополнительных; жёлтый кружок - положение Патомского кратера

вышение сопротивления. За перегибом следуют длинные нисходящие ветви, причём уровень удельного электрического сопротивления в районе 1 с понижается до $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В диапазоне $10^{-4} - 10^{-2} \text{ с}$ кривые кажущегося сопротивления для TM моды существенно превышают кривые для TE моды. При этом кривые для соседних точек заметно отличаются между собой по форме и уровню. Фазовые кривые (см. рис. 5, B_1) также имеют существенное различие в этом же диапазоне. Следует отметить высокий уровень фазовых поперечных кривых на периодах более 0,01 с и выход фазы отдельных кривых за пределы своей четверти, что свидетельствует о трёхмерном строении среды. На кривых типпера наблюдаются относительно большие значения амплитуды в диапазоне $10^{-4} - 10^{-3} \text{ с}$ (см. рис. 5, C_1), которые достигают значений 0,5 (безразмерная величина равна нулю в однородной или горизонтально-слоистой среде), что свидетельствует о наличии значительных горизонтальных неоднородностей.

В центральной части профиля (см. рис. 5, A_2 и рис. 5, B_2) как амплитудные, так и фазовые поперечные кривые мало отличаются по форме от таких на соседних точках АМТЗ. В короткопериодном диапазоне на продольных кривых наблюдаются нисходящие ветви, в то время как на поперечных - восходящие. Продольные кривые кажущегося сопротивления на периоде 0,01 с превыша-

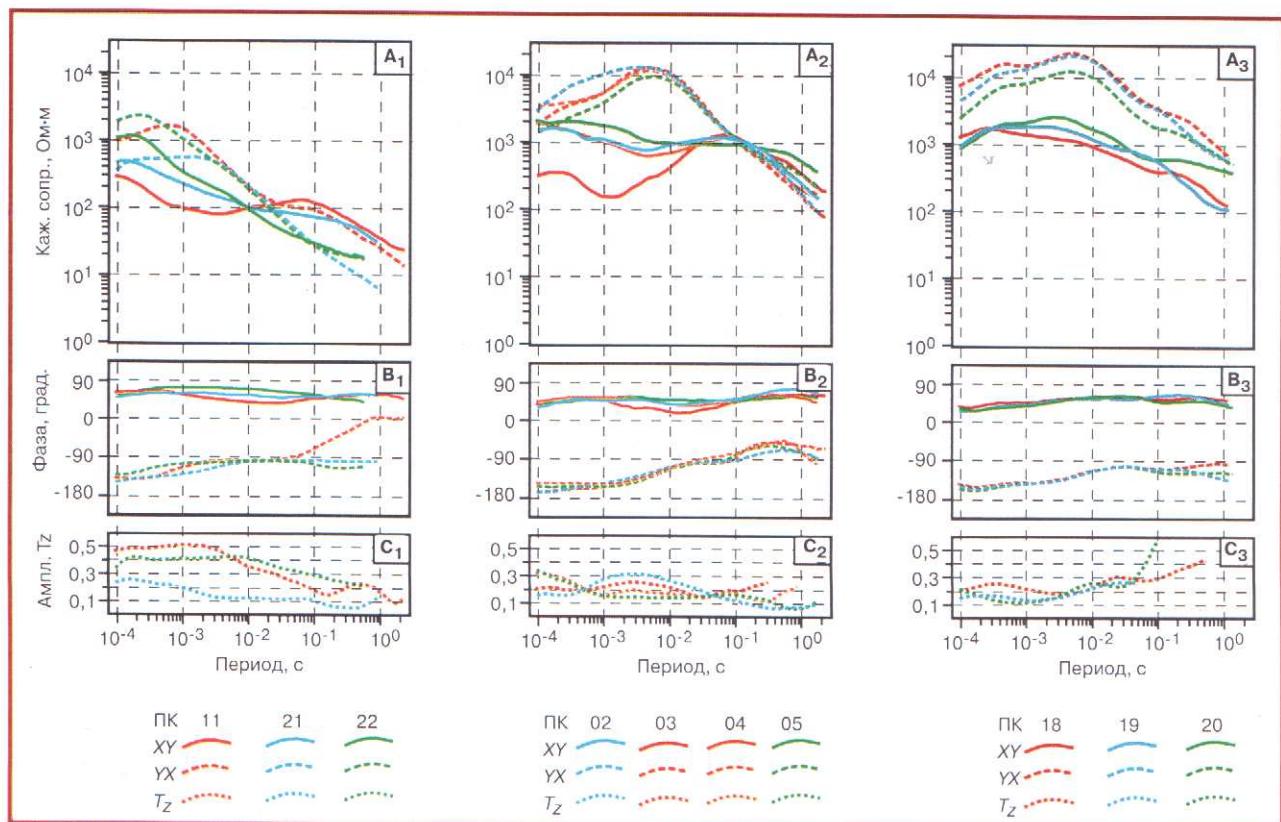


Рис. 5. Типичные кривые кажущегося сопротивления (А), фазы импеданса (В) и типпера (С) для юго-западной (слева), центральной (по центру) и северо-восточной (справа) частей профиля:
сплошные линии - кривые для TE моды (XY), пунктирные - для TM моды (YX), точки - кривые типпера

ют поперечные на порядок. В диапазоне периодов более 0,1 с оба типа кривых имеют устойчивые нисходящие ветви и мало отличаются по уровню. Фазовые поперечные кривые в диапазоне более 0,03 с покидают свою четверть. На кривых типпера (см. рис. 5, C_2) наблюдается существенная аномалия (0,3) на периоде 0,03 с.

В северо-восточной части профиля отмечается подобие формы продольных и поперечных кривых кажущегося сопротивления, при этом поперечные амплитудные кривые (см. рис. 5, A_3) располагаются на порядок выше продольных. Начальный уровень кривых составляет 1000 - 10 000 Ом·м, что на порядок выше, чем в юго-западной части профиля. По форме кривых кажущегося сопротивления отмечается наличие в разрезе как минимум трёх пачек пород повышенного сопротивления. Фазовые кривые в подавляющем числе случаев не покидают свою четверть. В амплитудах типпера отмечаются аномальные эффекты на самых малых периодах, а также на периоде более 100 с.

Анализ магнитовариационных параметров. Результаты обработки данных магнитовариационных съёмок представлены кривыми амплитуды типпера (см. рис. 5), вертикальным разрезом типпера (рис. 6), схемой распределения реальных индукционных векторов (рис. 7) и разрезом реальных индукционных векторов (рис. 8).

На разрезе амплитуды типпера (см. рис. 6) проявляются субвертикальные или наклонные границы (пикеты АМТЗ 21, 3 и 17). При этом наиболее яркой является аномалия в районе ПК 21. Левый максимум для этой аномалии несколько больше правого, что позволяет предположить, что это крутопадающая в северо-восточном направлении [10] структура. Аномалия в районе ПК 3 наблюдается в диапазоне периодов от 10^{-4} до 10^{-2} с. Несмотря на то, что правая часть аномалии представлена не полностью (находится за пределами диапазона АМТЗ), по морфологии аномалии можно сказать, что она связана с геологической структурой северо-восточного падения. Ярко выраженной глубинной аномалии проводимости под Патомским кратером не наблюдается. Морфологию аномалии в районе ПК 17 определить сложно.

План индукционных векторов на разных частотах (см. рис. 7) однозначно фиксирует аномальный объект в районе ПК 3 (Патомский кратер) как высокоомный объект с северо-восточным падением. На частоте 3000 Гц на ПК 3 происходит разворот направления реальных индукционных векторов. Слева от ПК 3 векторы ориентированы преимущественно в южном и юго-западном направлении, в то время как восточнее векторы ориентированы в северном и северо-восточном направлениях. На частоте 300 Гц подобный разворот реальных индукционных векторов происходит северо-восточнее в районе ПК 5, а на частоте 100 Гц в районе ПК 12. Всё это свидетельствует о северо-восточном паде-

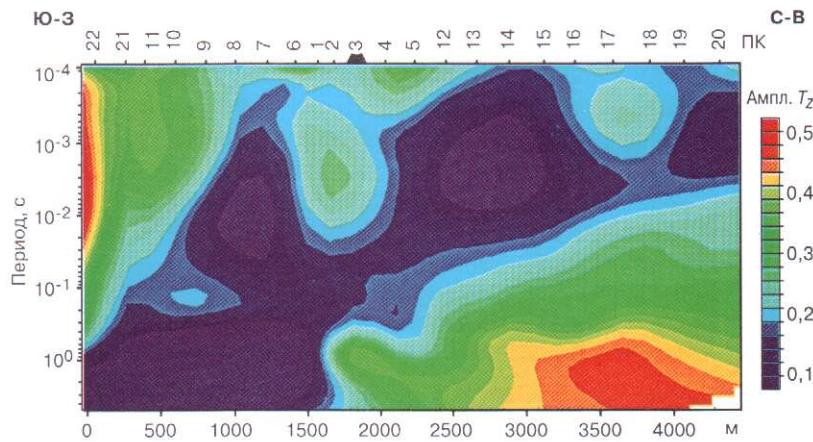


Рис. 6. Вертикальный разрез амплитуды типпера

нии оси аномального объекта (Патомского кратера). На более низких частотах аномальный эффект затухает. Более ярко и практически на всех приведённых частотах проявляется аномальный объект в районе ПК 21. Это контрастный проводящий объект, характеризующийся субвертикальным падением границ. Северо-восточнее этого аномального объекта реальные индукционные векторы ориентированы в юго-западном направлении, а юго-западнее реальные векторы резко изменяют направление на северо-восточное. Аномальный объект в районе ПК 17 на картах индукционных векторов ярко не проявляется.

Индукционные вектора позволяют фиксировать аномальные объекты не только в сечении профиля наблюдений, но и на удалении от него. На частоте 300 Гц поведение индукционных векторов в районе ПК 1 - 7 указывает на наличие аномального объекта в районе

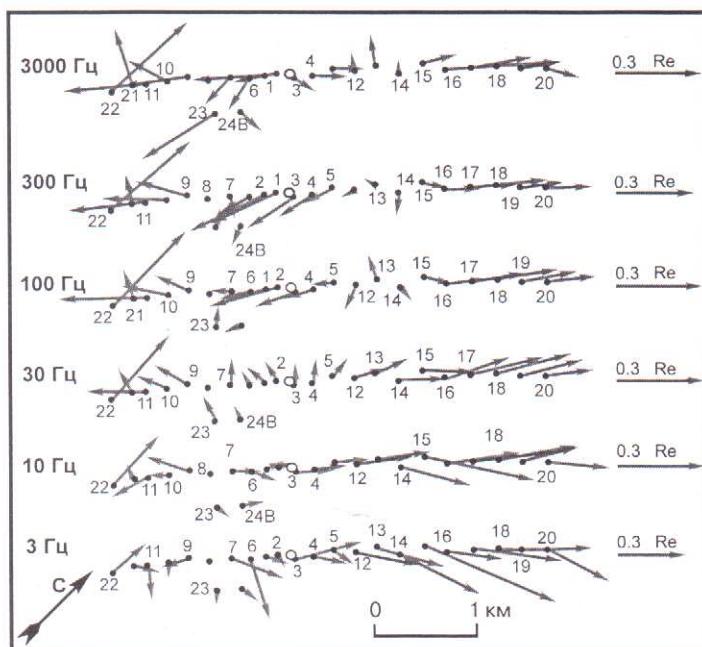


Рис. 7. Карты реальных индукционных векторов в конвенции Паркинсона (направление на проводник) для шести различных частот

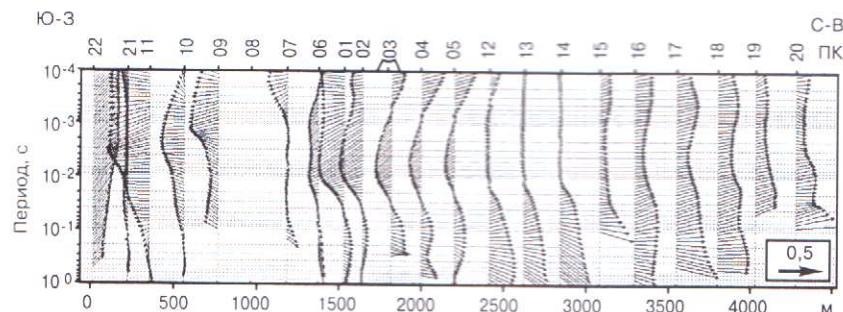


Рис. 8. Проекция индукционных векторов в конвенции Паркинсона (направление на проводник) на вертикальную плоскость

ПК 23 и 24. На частоте 3000 Гц индукционные векторы в районе ПК 12 - 14 указывают на наличие аномального объекта в северо-западном направлении.

Аномальные объекты, описанные по картам индукционных векторов, гораздо более наглядно фиксируются на вертикальных разрезах реальных индукционных векторов (см. рис. 8). Здесь имеют место как минимум три уровня аномальных объектов. Первый (ближайший к поверхности) уровень отмечается на периодах 10^{-4} - 0,03 с, второй 10^{-3} - 0,02 с и третий в диапазоне периодов 0,02 - 1 с.

Результаты интерпретации данных АМТ-МВП

Поведение амплитудных и фазовых кривых АМТЗ, реальных индукционных векторов четко указывает на сложное геологическое строение в районе Патомского кратера. Серьёзную проблему создает также выход фазовых кривых основных импедансов за пределы своих четвертей, преимущественно на частотах ниже 100 Гц.

Одномерная (1D) интерпретация применялась для создания первого приближения модели геоэлектрического разреза. Для 1D-интерпретации использовались инвариантные (эффективные) амплитудные и фазовые кривые.

Двумерная (2D) инверсия выполнялась в рамках программного комплекса WinGLink. Использовалась сглаженная инверсия Р. Макки (алгоритм NLCG [2]).

Размер сетки ячеек составлял 50×60 . Из-за выхода на целом ряде точек фаз основных импедансов за пределы своих четвертей авторы были вынуждены ограничить используемый диапазон кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданда до 100 Гц. Таким образом, на каждой точке АМТЗ для двумерной инверсии использовались кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданда для ТЕ (ХУ, азимут -45°), ТМ (УХ, азимут 45°) в диапазоне частот 10 000 - 100 Гц и модуль типпера в диапазоне частот 10 000 - 0,3 Гц. Было выполнено около 100 инверсий с числом итераций не менее 40 каждая, чтобы получить устойчивую двумерную модель (рис. 9) и приемлемый уровень расхождения наблюденных и рассчитанных кривых АМТЗ и типпера (RMS ошибка составила 3,5%). Дальнейшее снижение ошибки авторы не считают обоснованным из-за существенного отличия изучаемого разреза от двумерного. Следует отметить, что полученную в результате 2D-инверсии модель геоэлектрического разреза следует рассматривать как один из наиболее вероятных вариантов. Его уточнение возможно с привлечением геологических, геохимических и других данных исследований, проверки различных гипотез происхождения Патомского кратера.

Полученная в результате 2D-инверсии модель геоэлектрического разреза для диапазона глубин 0 - 3 км приведена на рис. 9. На фоне относительно высокомного разреза с уровнем удельных сопротивлений около 10 000 Ом·м отмечаются три пачки низкоомных пород с удельным сопротивлением от единиц до первых сотен ом-метров. Эти проводящие пачки отделены друг от друга высокоомными породами. Высокоомные слои предположительно связаны с толщами метаморфизованных терригенно-карбонатных пород протерозойского возраста. Залегающие согласно с ними проводящие слои соответствуют углистым метаморфизованным сланцам и углистым песчаникам.

Свойства проводящих пачек, мощность которых достигает 200 - 600 м, существенно изменяются в ла-

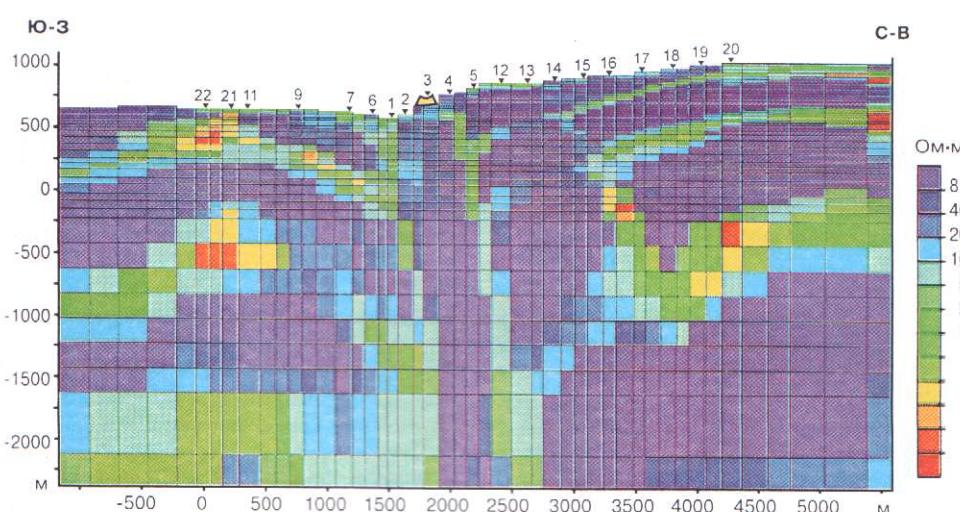


Рис. 9. Предварительная 2D-модель геоэлектрического разреза через Патомский кратер

теральном направлении. Данные пачки являются маркёрами, позволяющими восстановить макроструктуру геоэлектрического разреза. По поведению этих проводящих пород можно наметить синклинальную складку с пологими углами падения в центральной и северо-восточной частях профиля и антиклинальную складку в юго-восточной части профиля с более крутыми углами падения пород. В замке антиклинальной складки (ПК 22, 21) на двух уровнях (абсолютные отметки верхних границ соответственно 400 и 500 м) наблюдаются контрастные аномалии пониженного сопротивления (единицы ом-метров), которые отмечались выше в поведении реальных индукционных векторов в районе ПК 21. Другая, менее контрастная проводящая область наблюдается в северо-восточной части профиля в районе ПК 16, 17. Абсолютная отметка кровли находится на уровне 0 м, отмечается крутное падение объекта в северо-восточном направлении.

Нарушения характера геоэлектрического разреза наблюдаются непосредственно в районе Патомского кратера (ПК 2, 3, 4), а также в районе ПК 13 - 15. Патомский кратер расположен над крутопадающим (углы падения около 80°) высокоомным объектом. От вмещающей среды этот объект отделён двумя проводящими субвертикальными зонами (удельное сопротивление - первые сотни ом-метров) шириной около 250 м, которые, возможно, связаны с зонами повышенной трещиноватости. Высокоомная зона, расположенная непосредственно под кратером и обрамлённая проводящими образованиями, по всем геолого-структурным признакам не может являться составной частью карбонатно-терригенных раннепротерозойских комплексов. Говорить о вещественном составе данного объекта на настоящем этапе не представляется возможным без привлечения данных геохимических и других исследований. Однако аномальный облик этой структуры на геоэлектрическом разрезе во всём диапазоне изученных глубин позволяет с большей уверенностью говорить об эндогенной природе Патомского кратера.

Заключение

По результатам исследований методом АМТ-МВЗ по профилю, пересекающему Патомский кратер, был получен геоэлектрический разрез до глубины 3000 м. Выполненный анализ первичных данных, а именно тензора импеданса и МВ параметров, показал сложное гетерогенное строение среды с проявлением многочисленных факторов, искажающих данные АМТЗ (создающих трёхмерные эффекты в данных АМТЗ). Использование данных типпера при 2D-инверсии позволило получить надёжный геоэлектрический разрез, адекватно отражающий геологическую ситуацию территории исследования.

Выполненная предварительная геологическая интерпретация геоэлектрического разреза позволила выделить во вмещающей Патомский кратер среде блоки метаморфизованных терригенно-карбонатных отложений, характеризующиеся высокими значениями удельного сопротивления, и прослои углистых сланцев, отличающиеся пониженными значениями удельного

сопротивления. Кроме того, были выделены субвертикальные проводящие аномальные зоны шириной до 200 м, предположительно связанные с разрывными нарушениями.

Основным результатом выполненных исследований АМТ-МВЗ являются выделенные под Патомским кратером аномалии повышенных значений удельного сопротивления, что, с нашей точки зрения, свидетельствует в пользу эндогенной гипотезы формирования этой структуры.

Авторы рассматривают приведённые в данной работе результаты как предварительные и надеются на продолжение интерпретации с привлечением других геолого-геофизических данных по этому району, а также на 2D- и 3D-моделирование с целью проверки различных гипотез. Для построения надежной 3D-модели Патомского кратера желательно проведение двух параллельных профилей АМТЗ-МВЗ с двух сторон от проиденного.

Авторы выражают благодарность группе "Метрополь" и лично М. В. Слипенчуку за участие и высокий уровень организации полевой экспедиции летом 2010 г., редакции "Комсомольской правды" за неослабевающий интерес к проблеме и журналисту газеты Андрею Мoiseенко за помощь в проведении полевых электроразведочных работ, иркутскому астроному Дмитрию Семенову за помощь в проведении полевых работ, а также проф. А. В. Поспелеву и его коллегам (Иркутское электроразведочное предприятие) за предоставленные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипин В. С., Федоров А. М., 2008, Происхождение Патомского кратера (Восточная Сибирь) по геолого-геофизическим данным: Докл. РАН, **423**, 3, 361 - 366.
2. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. Д., 2009, Модели и методы магнитотеллурики: М., Научный мир.
3. Воронин В. И., 2006, Предварительные результаты дендрохронологического анализа спилов лиственницы даурской, отобранных в районе Патомского кратера: Избранные проблемы астрономии. Материалы научно-практической конференции Небо и Земля, посвящённой 75-летию астрономической обсерватории ИГУ: Иркутск, 169 - 176.
4. Ингеров О., 2005, Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов: Записки Горного института, **162**, 15 - 25.
5. Колпаков В. В., 1951, Загадочный кратер в Патомском нагорье: Природа, **1** - **2**, 58-61.
6. Лео Фокс, 2005, Современные тенденции в развитии элекстроразведочного аппаратурно-программного комплекса: Записки Горного института, **162**, 9 - 14.
7. Рокитянский И. И., 1975, Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования: Киев, Наукова думка.
8. Gamble T. D., Gouba W. M. and Clark J., 1979, Magnetotellurics with a remote reference: Geophysics, **44**, 53 - 68.
9. Ingerov O., Ermolin E., 2010, The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic: Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010, September 18 - 24.

10. Ingerov O., Fox L., Golyashov A., Colin A., Ingerov I., Non-grounded Surface Electromagnetic Prospecting Technique., Proceedings of 71st EAGE Conference and Exhibition: Amsterdam, The Netherlands, 8 - 11 June 2009.
11. Sims W. E., Bostick F. X., Smith J. R. and Smith H. W., 1971, The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data: Geophysics, 36, 5, 938 - 942.

ОБ АВТОРАХ



**Сергей Михайлович
МИРОНОВ**

Председатель Совета Федерации Федерального собрания РФ. В 1980 г. окончил Ленинградский горный институт им. Г. В. Плеханова. Профессии инженера-геофизика посвятил 17 лет. E-mail: mironov@mironov.ru.



**Олекс
ИНГЕРОВ**

В 1973 г. закончил Днепропетровский горный институт по специальности горный инженер-геофизик. Учился в аспирантуре Днепропетровского горного института, с 1989 г. кандидат геол.-минер. наук. С 1999 г. работает в компании "Феникс Дженофизикс" (Торонто, Онтарио, Канада) как ведущий геофизик, с 2003 г. вице-президент компании. Область научных интересов: совершенствование аппаратурно-программного обеспечения, совершенствование EM технологий, углубленная интерпретация EM данных. E-mail: oingerov@phoenix-geophysics.com.



**Алексей Сергеевич
ЕГОРОВ**

Декан геологоразведочного факультета, заведующий кафедрой геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского государственного горного университета, профессор, доктор. геол.-минер. наук. Область научных интересов: исследования глубинного строения, тектоники и геодинамики земной коры и верхней мантии. E-mail: asegorov@spmi.ru.



**Евгений Юрьевич
ЕРМОЛИН**

Аспирант кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского государственного горного университета. Область научных интересов: развитие технологий обработки данных (аудио) магнитотеллурических зондирований и интерпретации данных магнитовариационных исследований, комплексная интерпретация данных магнитотеллурических исследований при проведении прогнозно-поисковых и региональных геофизических исследований. E-mail: ermolin_stud@mail.ru.



**Роман Александрович
СУХАНОВ**

Студент 4-го курса кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского государственного горного университета. E-mail: sukhanov_ra@mail.ru.

Рецензент - доктор техн. наук И. А. Безрук.