

УДК 550.37

**Н.Н.НЕВЕДРОВА**, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., доцент,  
*NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru*

**А.М.САНЧАА**, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр., *SanchaaAA@ipgg.nsc.ru*  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

**С.М.БАБУШКИН**, директор, *bab@gs.nsc.ru*  
Сейсмологический филиал геофизической службы СО РАН, Новосибирск

**N.N.NEVEDROVA**, PhD in geol. & min. sc., senior research assistant, associate professor,  
*NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru*

**A.M.SANCHAA**, PhD in geol. & min. sc., research assistant, *SanchaaAA@ipgg.nsc.ru*  
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,

**S.M.BABUSHKIN**, director, *bab@gs.nsc.ru*  
Seismological branch of Geophysical survey SB RAS, Novosibirsk

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ

Представлены результаты повторных электромагнитных зондирований становлением поля (ЗС), выполненных в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г., которое произошло в ближайшем горном обрамлении Чуйской тектонической впадины Горного Алтая. Регулярные измерения продолжают в течение шести лет. Анализируются также данные ЗС, полученные ранее в конце XX в. На основании интерпретации полевых данных за 1980 и 2004-2010 гг. выявлена динамика изменений электрических параметров разреза после сильного сейсмического воздействия.

**Ключевые слова:** электромагнитные зондирования становлением поля, Горный Алтай, Чуйское землетрясение, вариации электропроводности.

## RESULTS OF REGULAR TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS IN THE WESTEN PART OF CHUYA DEPRESSION IN GORNYYY ALTAI

The paper presents some results obtained by transient electromagnetic (TEM) sounding. The measurements were performed in the epicenter part of Chuya earthquake of 2003, which occurred in the nearest mountain frame of Chuya tectonic depression in Gornyy Altai. Regular survey have been continued for 6 years. Electrical prospecting data obtained at the late of the 20<sup>th</sup> century on the territory of the Chuya depression were analyzed. Field investigation carried out on the territory of this depression in 1980, 2004-2006 allows time history of electrical parameter changes to be traced after great seismic event in this region.

**Key words:** transient electromagnetic soundings, Gornyy Altai, Chuya earthquake, electrical parameter changes.

В настоящее время в районе Горного Алтая проводятся комплексные электромагнитные исследования, связанные с изучением последствий разрушительного Чуйского землетрясения с магнитудой  $M = 7,3$  по шкале Рихтера. Оно произошло 27 сентября 2003 г. и является наиболее сильным за инструментальный период сейсмологических

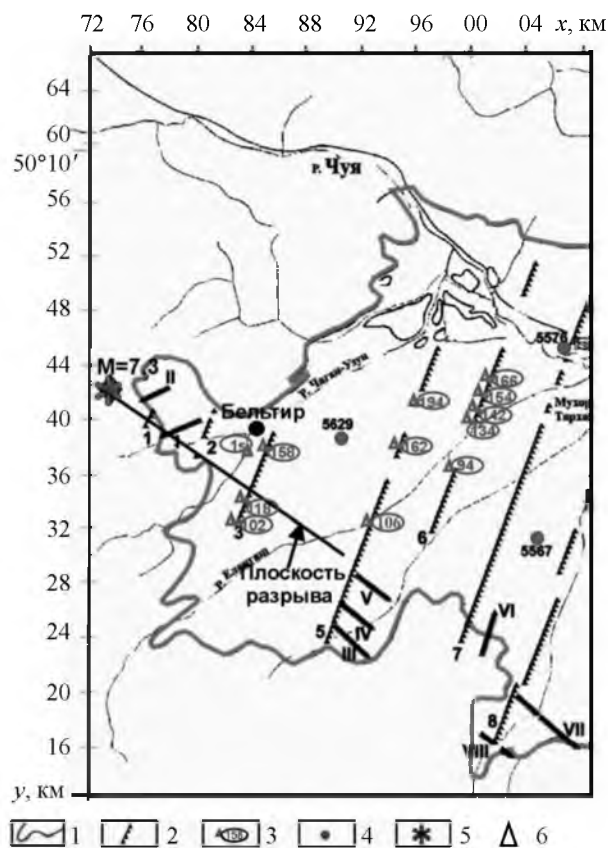


Рис.1. Схема размещения индукционных зондирований за разные годы наблюдений

1 – граница горного обрамления; 2 – профили ЗС 1980-х гг.; 3 – современные пункты ЗС; 4 – скважины; 5 – эпицентр Чуйского землетрясения; 6 – пункты измерений ЗС, повторяемых в течение полевых сезонов 2004-2009 гг.

наблюдений. Очаговая зона располагается на территории Чуйской и Курайской впадин Северо-Чуйского хребта. Основной разрыв землетрясения прослеживается на земной поверхности в виде прерывистой 20-километровой полосы сеймотектонических трещин, рвов, оползней и смещений грунта. Были зафиксированы конуса выноса грязевых грифонов, через которые во время землетрясения выбрасывались разжиженные породы верхней части разреза в очень больших объемах. Отмечено существенное изменение гидрогеологических условий Чуйского и Курайского артезианских бассейнов, а также гидрохимического состава подземных вод [1]. Глобальное перераспределение поровой и пластовой влаги, связанное с сейсмическим воздействием, является дополнительным основанием применения

электромагнитных методов в Чуйско-Курайской сейсмоактивной области.

Регулярные наблюдения методами электрических и электромагнитных зондирований с активным источником, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС) в этой области были начаты в 2004 г. Метод ЗС выполняется в нескольких модификациях с гальваническими и индукционными установками. Основная цель работы – выявление закономерностей процесса восстановления геологического массива горных пород после разрушительного сейсмического воздействия на основе изучения временных вариаций электропроводности верхней части земной коры.

Следует отметить, что существует значительный объем фондовых материалов ВЭЗ и ЗС, полученных на территории Алтайских впадин во второй половине прошлого века до разрушительного землетрясения. В конце 80-х гг. на территории Чуйской впадины были выполнены измерения методом ЗС с индукционными установками «сосновые» петли по системе профилей, пересекающих впадину практически с юга на север. Сторона петли равнялась 400 м с таким же шагом по профилю. Компьютерная интерпретация этих детальных полевых данных, выполненная в 2001 г., позволила построить основную геоэлектрическую модель осадочного чехла депрессии и определить геоэлектрические характеристики разреза до Чуйского землетрясения [3].

Анализ сейсмологических данных за последнее столетие показал, что в течение длительного времени в области Чуйской впадины значимых сейсмических событий не происходило и что геоэлектрические параметры разреза можно считать стабильными. Следовательно, измерения, выполненные после сильного землетрясения, позволят выявить эволюцию параметров геологического массива, нарушенного крупным сейсмическим событием.

Здесь рассматриваются результаты повторных индукционных измерений ЗС, начатых в 2004 г. в западной части Чуйской впадины. Современные пункты зондирований раз-

мещены на старых профилях 1980-х гг. с сохранением размеров установок предшествующих работ (рис. 1).

На рис. 1 представлена схема полевых наблюдений методом ЗС с индукционными установками в западной части Чуйской впадины и отмечены эпицентр Чуйского землетрясения и примерная плоскость тектонического разрыва скважины, а также профили ЗС, выполненные до землетрясения. Интерпретация всего объема полевых данных выполнена в компьютерных комплексах на основе решения обратных задач [4, 5]. Этот подход к обработке позволил получить обоснованные количественные оценки вариаций электропроводности. В ходе интерпретации были привлечены априорные геологические данные, литолого-стратиграфические разрезы, тектонические схемы [2]. Основные выводы сделаны на основании комплексного геолого-геофизического анализа.

Вначале рассмотрим данные для пунктов, наиболее близких к тектоническому разрыву землетрясения. Рис. 2 отражает динамику изменений геоэлектрических параметров для пункта 106 за 2004-2009 гг. Пункт находится в зоне основного разрыва на берегу р. Елангаш. Общая мощность осадков на этом участке достигает 400 м. В разрезе присутствуют два низкоомных горизонта общей мощностью в 200 м. Если сравнить геоэлектрические модели для этого пункта до и сразу после Чуйского землетрясения (см. таблицу), то можно отметить, что вариации удельного электрического со-

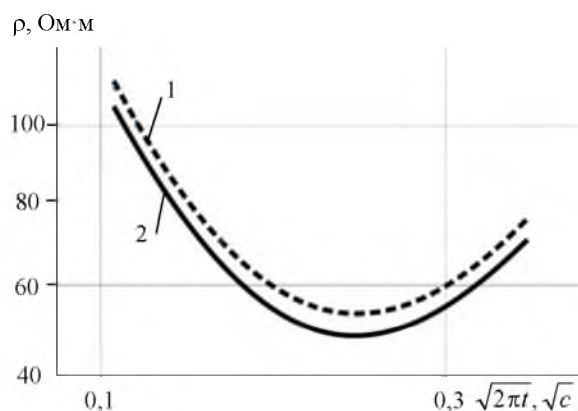


Рис. 3. Кривые ЗС до (1) и после (2) локального землетрясения по данным пункта 106

противления (УЭС) после события были значительными для всех слоев разреза и достигали 100 % и более.

В течение первых трех лет (2004-2006 гг.) наблюдается постепенное восстановление электрических параметров разреза, они начинают приближаться к значениям этих параметров до события. Затем, начиная с 2007 г., среда находится в новом стабильном состоянии – УЭС всех слоев модели в течение последних трех лет изменяются незначительно.

В этом же пункте было зафиксировано изменение геоэлектрических характеристик во время локального, достаточно сильного землетрясения, произошедшего в ближайшем горном обрамлении Чуйской впадины 11 августа 2005 г., в 22 ч по Гринвичу (координаты эпицентра: 49,9° с.ш., 87,9° в.д., магнитуда 4,3).

Геоэлектрическая модель до землетрясения может быть представлена следующим образом:

|               |     |     |     |      |
|---------------|-----|-----|-----|------|
| $\rho$ , Ом·м | 400 | 145 | 8,2 | 2000 |
| $H$ , м       | 200 | 110 | 82  | –    |

После землетрясения зарегистрированы следующие значения параметров:

|               |     |     |     |      |
|---------------|-----|-----|-----|------|
| $\rho$ , Ом·м | 300 | 90  | 8,4 | 2000 |
| $H$ , м       | 195 | 110 | 82  | –    |

Согласно измерениям, реакция среды на локальное землетрясение заключается в общем понижении УЭС (рис. 3). Полевые данные были подвергнуты инверсии с целью оценки количественных изменений УЭС осадочных слоев разреза. Решение обратной задачи показало, что вариации этого параметра после землетрясения достигли 50 %. Причем наиболее сильно изменились сопротивления двух верхних горизонтов: значения УЭС после события стали меньше.

На рис. 4 приведены полевые кривые и результаты интерпретации за несколько лет для пункта 158. Пункт расположен в долине р. Чаган. В геологическом отношении эта долина является тектоническим грабеном. Грабен на участке измерения выполнен в основном галечниками с присутствием в

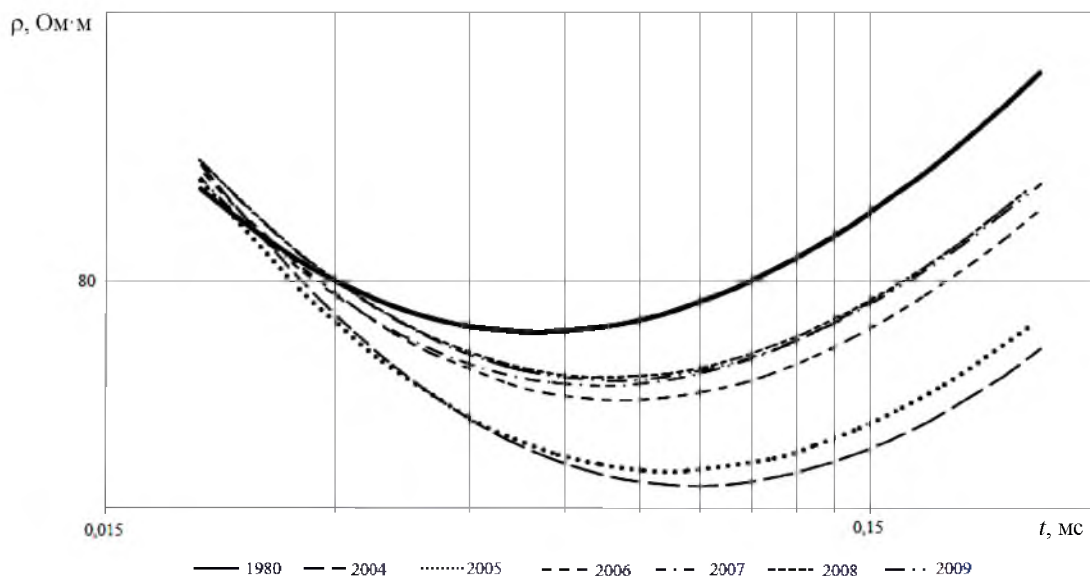


Рис.2. Кривые кажущегося удельного сопротивления  $\rho$  за 1980, 2004-2009 гг. Пункт 106

**Геоэлектрические модели разреза для пунктов электромагнитного зондирования становлением поля**

| Год  | Пункт 106     |         | Пункт 158     |         | Пункт 102     |         | Пункт 134     |         |
|------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
|      | $\rho$ , Ом-м | $H$ , м | $\rho$ , Ом-м | $H$ , м | $\rho$ , Ом-м | $H$ , м | $\rho$ , Ом-м | $H$ , м |
| 1980 | 350           | 200     | 1100          | 130     | 1106          | 342     | 405           | 280     |
|      | 50            | 110     | 700           | 101     | 76            | 123     | 17,7          | 590     |
|      | 15            | 83      | 12            | 45      | 23            | 300     | 14,1          | 170     |
|      | 2000          | –       | 235           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2004 | 900           | 205     | 900           | 130     | 1300          | 342     | 405           | 280     |
|      | 170           | 110     | 520           | 102     | 180           | 124     | 17,1          | 590     |
|      | 7,5           | 83      | 10,8          | 44      | 31            | 310     | 13,5          | 170     |
|      | 2000          | –       | 260           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2005 | 600           | 200     | 1321,7        | 136,2   | 1000          | 342     | 405           | 280     |
|      | 160           | 110     | 831,5         | 107,5   | 170           | 124     | 17,1          | 590     |
|      | 8             | 83      | 11,6          | 48,4    | 30            | 305     | 13,5          | 170     |
|      | 2000          | –       | 323,5         | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2006 | 900           | 206     | 1300          | 130     | 1200          | 342     | 420           | 280     |
|      | 80            | 110     | 830           | 105     | 140           | 123     | 17            | 590     |
|      | 10            | 83      | 11,2          | 44      | 31            | 305     | 13            | 170     |
|      | 2000          | –       | 240           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2007 | 350           | 200     | 1000          | 130     | 1109          | 342     | 405           | 280     |
|      | 80            | 110     | 700           | 100     | 130           | 123     | 17,7          | 590     |
|      | 11            | 83      | 12,5          | 43      | 28            | 300     | 13,5          | 170     |
|      | 2000          | –       | 234           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2008 | 350           | 205     | 1000          | 130     | 1106          | 342     | 405           | 280     |
|      | 85            | 115     | 700           | 100     | 135           | 123     | 17,4          | 590     |
|      | 11            | 84      | 13            | 42      | 28,5          | 300     | 13,4          | 170     |
|      | 2000          | –       | 234           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |
| 2009 | 350           | 205     | 1000          | 130     | 1500          | 342     | 405           | 280     |
|      | 85            | 115     | 700           | 100     | 145           | 123     | 17,4          | 590     |
|      | 10,8          | 83      | 13,4          | 43      | 30,3          | 300     | 13,4          | 170     |
|      | 2000          | –       | 234           | –       | 2000          | –       | 2000          | –       |

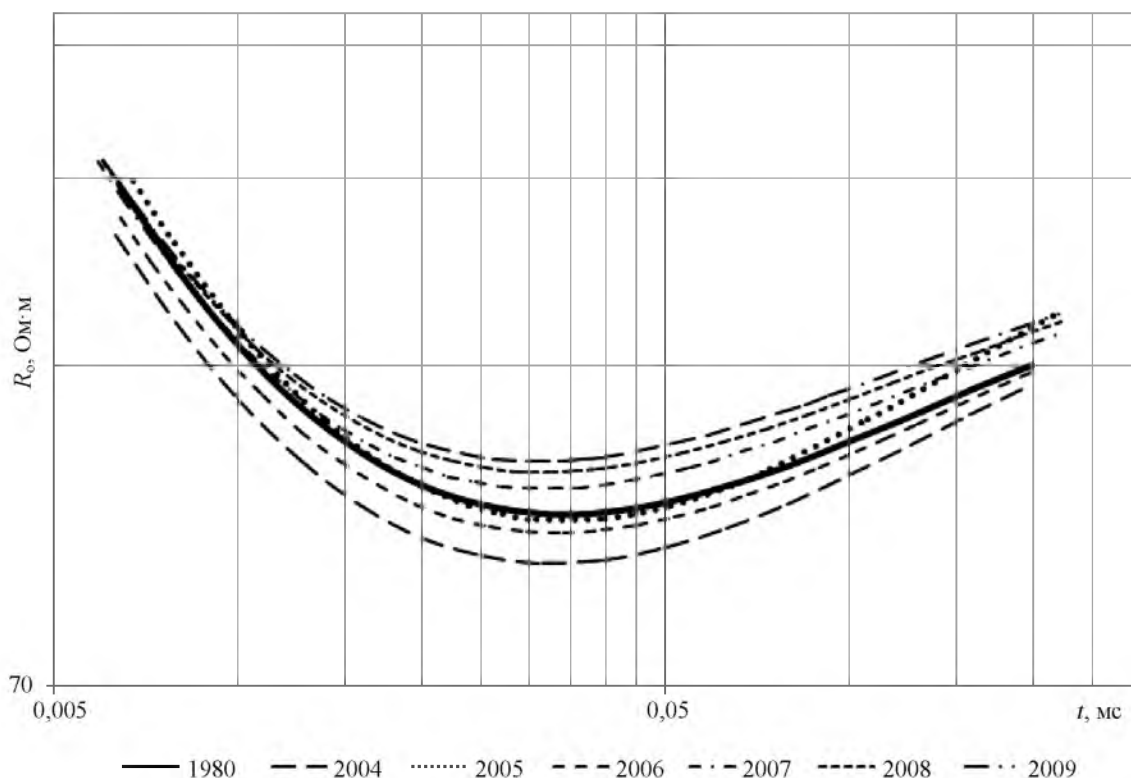


Рис.4. Кривые кажущегося удельного сопротивления за несколько лет наблюдений (пункт 158)

нижней части разреза маломощного слоя глин и песчаников. Общая мощность осадков в районе пункта достигает 300 м, но толщина проводящего горизонта незначительна – всего 45 м, поэтому и реакция на сейсмическое воздействие иная. Сравнение геоэлектрических моделей позволяет сделать вывод, что наиболее значимые изменения геоэлектрических параметров разреза также наблюдались на следующий год после разрушительного землетрясения и далее в 2005 г. (см. таблицу).

Геоэлектрические модели за 2005 и 2006 г. различаются между собой незначительно, вариации УЭС всех слоев разреза не превышают 6-7 %. В 2007 г. УЭС всех слоев разреза восстановились до значений 1980 г., фактически модель 2007 г. соответствует модели, полученной до сейсмического события. В течение 2008-2009 гг. УЭС двух верхних высокоомных горизонтов не изменялось, но УЭС проводящего слоя постепенно повышался, что, скорее всего, связано с текущей сейсмичностью.

Анализ геоэлектрических моделей для пункта 102 показал, что в течение первых трех лет наблюдался процесс восстановления среды, аналогичный процессам в пунктах 158 и 106, а затем в 2009 г. значения УЭС всех слоев разреза увеличились. Пункты 158 и 102 находятся в одной геологической структуре, но в различных тектонических блоках, разделенных зоной основного разрыва Чуйского землетрясения, основной механизм которого определен, как правосторонний сдвиг. Эти блоки по сейсмологическим данным и измерениям GPS во время события двигались в разных направлениях. Полевые данные ЗС свидетельствуют, что современные тектонические условия также влияют на вариации электрических параметров разреза.

Пункт 134 находится в центральной части Чуйской впадины на значительном расстоянии (примерно в 20 км) от зоны основного разрыва. Изменения электрических параметров разреза за весь временной интервал измерений в этом пункте не превышало в среднем 7-8 % (см. таблицу). Ранее

при структурных исследованиях было установлено блоковое строение осадочного чехла и фундамента Чуйской депрессии. Анализ геолого-геофизических данных позволяет сделать вывод, что пункт 134 находится в пределах устойчивого блока, мало затронутого сейсмическим воздействием Чуйского землетрясения. Мощность осадочного чехла в районе этого пункта превышает 1000 м.

### Выводы

1. На основании интерпретации повторных измерений ЗС за 2004-2009 гг. выявлены особенности релаксации среды, нарушенной катастрофическим землетрясением. Показано, что по электромагнитным данным в течение первых трех лет после события в эпицентральной зоне наблюдается интенсивный процесс консолидации среды, который выражается в закономерных изменениях электрических параметров разреза, направленных, в основном, на восстановление значений, определенных по данным зондирований в 1980 г., когда состояние среды было стабильно.

2. На основании обработки повторных ежегодных электромагнитных измерений получены количественные оценки вариаций геоэлектрических параметров и выявлены закономерности процессов консолидации геологического массива после разрушительного землетрясения.

3. Результаты измерений свидетельствуют о высокой чувствительности электромагнитных методов к изменению напряженного состояния геологического массива. Реакция электрических параметров разреза на сейсмическое воздействие значительна (вариации параметров достигают 100 % и более) и зависит от энергетического класса сейсмических событий и геологических и геоэлектрических особенностей разреза.

Можно отметить, что все пункты регулярных наблюдений расположены в различных геологических структурах и реакция геоэлектрических параметров на сейсмическое воздействие для каждого из пунктов имеет свои особенности. Например, пункт 106 расположен в разломной зоне, и общая мощ-

ность низкоомных осадков в районе этого пункта в несколько раз выше, чем для пункта 158. Все это обуславливает максимальные вариации электропроводности, полученные для пункта 106.

4. Полученные данные позволяют выбрать оптимальное размещение пунктов для стационарных (ежедневных) наблюдений за электромагнитным полем на территории Чуйской депрессии.

Исследования выполнены при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России за 2009-2013 гг., государственный контракт № П792».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кац В.Е. Гидрогеологические особенности в эпицентральной части Чуйского землетрясения / В.Е.Кац, Ю.В.Робертус // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Горно-Алтайск, 2004. С.99-101.

2. Лузгин Б.Н. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая / Б.Н.Лузгин, Г.Г.Русанов // Геология и геофизика. 1992. № 4. С.23-29.

3. Неведрова Н.Н. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований / Н.Н.Неведрова, М.И.Эпов, Е.Ю.Антонов // Геология и геофизика, 2001. Т.42. № 9. С.1399-1416.

4. Хабинов О.Г. Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS / О.Г.Хабинов, И.А.Чалов, А.А.Власов, Е.Ю.Антонов // ГЕО-Сибирь-2009: Сб. науч. ст. Новосибирск, 2009. С.108-113.

5. Эпов М.И. Автоматизированная система интерпретации электромагнитных зондирований / М.И.Эпов, Ю.А.Дашевский, И.Н.Ельцов. Новосибирск, 1990. 29 с.

### REFERENCES

1. Kats V.E., Robertus Yu.V. Hydro-geological features in epicentral parts of Chujsky earthquake // Altay (Chujsky) earthquake: predictions, characteristics, consequences. Gorniy-Altaysk, 2004. P.99-101.

2. Luzgin B.N. Special features of Neogene sedimentations of the southeast of Mountain Altai // Geology and geophysics. 1992. № 4. P.23-29.

3. Nevedrova N.N., Epov M.I., Antonov E.Yu. Reconstruction of a deep structure of the Chuya Basin of Mountain Altai according to electromagnetic sounding data // Geology and geophysics. 2001. Vol.42. № 9. P.1399-1416.

4. Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. System of interpretation of transient electromagnetic sounding data EMS // Geo-Siberia-2009. Novosibirsk, 2009. P.108-113.

5. Epov M.I., Dashevsky Yu.A., Yeltsov I.N. The automated system of electromagnetic sounding interpretation. Novosibirsk, 1990. 29 p.