УДК 550.837+
551.248.2

Н.Н. Неведрова, М.Г. Рохина, А.Е. Шалагинов, А.М. Санчаа

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ)*

Проведено исследование эволюции напряженного-деформированного состояния геологического массива в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (Mw = 7.3) по результатам анализа регулярных полевых наблюдений методом становления электромагнитного поля (ЗС). Измерения выполнены в ряде пунктов, расположенных западной части Чуйской впадины Горного Алтая. Полевые работы продолжались в течение 12 лет (2004–2015 гг.). Анализ направлен на выяснения взаимосвязи вариаций удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород с происходящими сейсмотектоническими процессами с учетом геологического строения, сейсмологических данных. Интерпретация полевых данных ЗС основана на решении обратной задачи. Для расчета вариаций были оценены геоэлектрические параметры горных пород по данным ЗС прошлого столетия в период низкой сейсмической активности. Сопоставление результатов количественной интерпретации современных измерений и выполненных ранее, до Чуйского события, позволило проследить изменения геоэлектрических параметров разреза вскоре после Чуйского события и далее в афтершоковый период для характеристики состояния геологической среды.

Ключевые слова: зондирование становлением электромагнитного поля, регулярные наблюдения, вариации электрофизических параметров, Горный Алтай, Чуйское землетрясение 2003 г.

Введение

Горный Алтай находится в западной части Алтае-Саянской складчатой области, относится к наиболее сейсмоактив-

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15–35–20614 (мол_а_вед).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 222–224.

ным заселенным районам России и в настоящее время является зоной рекреации и туризма с хорошо развитой инфраструктурой, поэтому исследования, связанные с сейсмобезопастностью актуальны. На его территории продолжаются комплексные геолого-геофизические работы, связанные с изучением последствий разрушительного землетрясения, которое произошло 27 сентября 2003 г. (М = 7,3). Очаговая зона захватила территории Чуйской и Курайской депрессий, а также их горное обрамление. За инструментальный период сейсмологических наблюдений это самое крупное событие в Алтае-Саянской области, получившее название «Чуйское землетрясение». Его магистральный разрыв вышел на поверхность в виде протяженной (около 60 км), прерывистой в плане системы сейсмодислокаций, достигающей в ширину ~4 км. В Чуйской впадине были разрушены жилые и административные здания, дороги в целом ряде населенных пунктов, включая поселки Бельтир, Ортолык [6, 8, 33].

Начиная с 2004 г. после Чуйского землетрясения, проводятся многолетние электромагнитные наблюдения за изменениями геоэлектрических параметров среды западной части Чуйской впадины, находящейся под воздействием афтершоковых сейсмотектонических процессов разрушительного события. Измерения методом ЗС с соосными установками большого размера (400×400 м) выполняются по трем профилям, и повторяются каждый год в летний период в течение полевых сезонов 2004–2015 гг. Пункты этих зондирований размещены на профилях ЗС 80-х годов прошлого столетия с сохранением момента установок предшествующих работ (см. рис. 1, Приложение).

На схеме рис. 1 показаны населенные пункты, граница горного обрамления, эпицентр Чуйского землетрясения, проекция плоскости магистрального тектонического разрыва на дневную поверхность, скважины, профили и пункты ЗС, выполненные в XX веке. Новые пункты регулярных измерений ЗС 2004–2015 гг. отмечены большими треугольниками.

Значительный объем материалов, полученный методами геоэлектрики (ЗС, ВЭЗ) на территории Чуйской впадины во второй половине прошлого столетия, позволил построить ее базовую модель и определить геоэлектрические параметры среды до разрушительного землетрясения, когда они были стабильны [24]. Интерпретация всего объема полевых данных ЗС выполнялась с использованием программных комплексов моделирования и инверсии ЭРА, EMS, разработанных в ИНГГ СО РАН [32, 28]. Сопоставление результатов количественной интерпретации современных данных (2004–2015 гг.) с данными 80-х гг. XX века дает возможность оценить вариации электрофизических параметров массива горных пород западной части Чуйской впадины, проследить процесс их изменения после разрушительного события и установить взаимосвязь с сейсмическим режимом территории.

Итак, в статье рассмотрено применение долговременных электромагнитных наблюдений с контролируемым источником в сейсмоактивных регионах (на примере Горного Алтая) с целью выяснения их реакции на разрушительное Чуйское землетрясение 2003 г. и события различной магнитуды афтершокового периода, а также обсуждаются следующие вопросы:

1. Подход к обработке и интерпретации данных мониторинга, при котором анализируются не измеренные величины, а результат инверсия полевых данных и вариации УЭС каждого слоя геоэлектрической модели.

2. Необходимость учета, наряду с сейсмологическими данными, особенностей геоэлектрического строения и геолого-тектонических обстановок для объяснения интенсивности вариаций УЭС и процессов эволюции массива горных пород.

Работы выполняются при поддержке разных грантов и проектов, и в зависимости от финансирования каждый год выполнялось разное количество пунктов ЗС. В 2004 г. измерительных пунктов было 12, а затем с 2005 по 2009 гг. только 5. Начиная с 2010–2015 гг. проводятся площадные измерения в 9 пунктах. От числа измерений зависят способы визуализация и результаты.

Интерпретация и анализ регулярных наблюдений зондирования становлением электромагнитного поля

Электромагнитные поля широко используются для регулярных наблюдений за геодинамическими процессами. Вариации электрофизических параметров в сейсмоактивных районах России и за рубежом оценивались разными методами геоэлектрики с естественными и контролируемыми источниками, но при этом в основном использовали измеренные сигналы либо их трансформации ($\rho_к$ для методов постоянного тока; ρ_τ, ρ_T для нестационарного и магнитотеллурического зондирований) [1, 4, 5, 27, 35, 37, 38].

Это исследование основано на решении обратной задачи, когда для каждого регулярного зондирования восстанавливается геоэлектрическая модель и рассматриваются вариации УЭС отдельных геоэлектрических горизонтов. Преимущество такого подхода в том, что вариации получаются более выразительные с большей амплитудой по сравнению с вариациями ЭДС, а также можно выделить интервалы разреза максимально чувствительные к сейсмическому воздействию и находящиеся на относительно небольших глубинах. Используя эти сведения можно не только оптимизировать размещение пунктов наблюдений, но и опираясь на особенности строения выявить закономерности изменения геоэлектрических параметров, их связь с сейсмическими событиями.

Зондирование становлением электромагнитного поля относится к одному из глубинных методов геоэлектрики с контролируемыми источниками и в геоэлектрических условиях межгорных впадин Горного Алтая позволяет получить УЭС и толщины горизонтов осадочного заполнения и верхней части фундамента. Базовая геоэлектрическая модель Чуйской впадины, построенная при интерпретации данных ЗС 80-х гг. прошлого столетия, соответствует четырехслойному разрезу с верхним слоем, в котором присутствует многолетняя мерзлота, грубообломочные породы (УЭС от 300 до 2000 Ом·м), двумя более проводящими горизонтами (для второго слоя УЭС в интервале 60–200 Ом·м и для третьего – УЭС 6–40 Ом·м), залегающими на опорном непроводящем основании. Модель является типичной и для западной части впадины. Далее по результатам инверсии полевых данных ЗС 2004–2015 г. с использованием программных комплексов ЭРА, EMS получены геоэлектрические параметры каждого слоя модели всех регулярных наблюдений ЗС. Вариации УЭС были рассчитаны относительно данных ЗС 80-х гг., полученных до разрушительного землетрясения в спокойный сейсмический период, когда состояние среды долгое время оставалось стабильным [30].

Для анализа вариаций УЭС и выявления их корреляции с сейсмическими событиями привлечены опубликованные сейсмологические данные. Решения механизма Чуйского землетрясения были построены различными центрами обработки и отличаются незначительно. Специалисты Калифорнийского технологического института относят модель к классу Finite Fault Model (FFM). Согласно их определению, плоскость разрыва имеет северо-западное простирание и наклонена под углом 85° [39]. По данным Гавардского каталога механизм определен как сдвиговый, оси сжатия и растяжения близгоризонтальны, по близвертикальной плоскости с простиранием СЗ-ЮВ произошел правый сдвиг [40].

Общее число сейсмических событий в районе Горного Алтая сразу после разрушительного землетрясения возросло на несколько порядков. Большая часть эпицентров афтершокового периода располагается в пределах Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны, которая включает Чуйскую и Курайскую впадины, разделяющий их Чаган-Узунский блок, Курайский, Северо-Чуйский, Южно-Чуйский хребты. Число землетрясе-

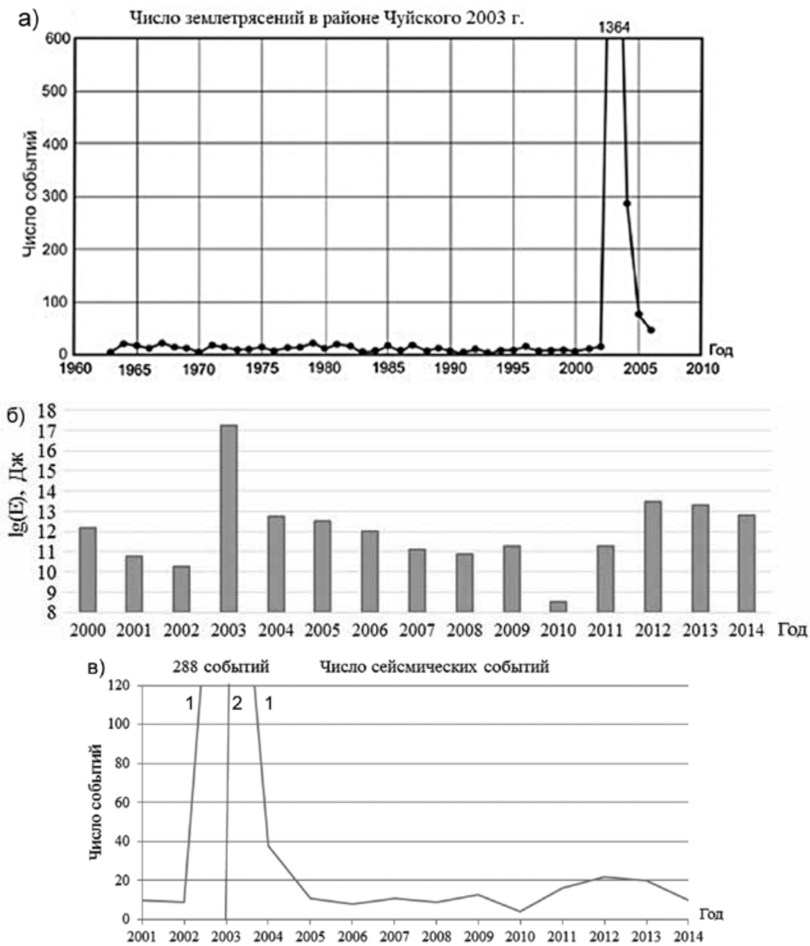

Рис. 2. Характеристики сейсмичности Чуйско-Курайской зоны: а) число землетрясений в районе Чуйского 2003 г. K >7 (1996–2006); б) гистограмма распределения выделившейся сейсмической энергии (2000–2014 гг.); в) число землетрясений K ≥ 10 в 2001–2014 гг.

ний $K \geq 8$ в этой зоне до и после события 2003 г., было оценено, начиная с 1960 г. (рис. 2, *а*) По временному интервалу 1965–1996 гг. определен фоновый уровень сейсмических событий, который соответствует 8–9 землетрясениям в год. График числа событий $K \geq 10$ и гистограмма выделившейся сейсмической энергии за 2000–2013 гг. Чуйско-Курайской зоны построены по опубликованным данным регионального каталога Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН (рис. 2, *б, в*).

Максимум событий наблюдался в 2003 г. В последующие годы, после Чуйского разрушительного землетрясения, их число постепенно уменьшалось, однако, фоновый уровень пока не достигнут (рис. 2, *б, в*) [12, 13, 14, 15]. Характеристики сейсмичности, включая распределение выделившейся сейсмической энергии, свидетельствуют о происходящем афтершоковом процессе, который наиболее интенсивно выражен в зоне сочленения Чаган-Узунского блока с Северо-Чуйским хребтом, в западной части Чуйской впадины, на юго-востоке Курайской [19]. Кроме того, сейсмологи отмечают периодические активизации, во время которых значительно повышается сейсмическая активность этой зоны в 2008–2009 гг., а затем в 2012–2013 гг. (рис. 2, *в*) [15]. Наибольшее количество гипоцентров землетрясений в Чуйско-Курайской зоне сосредоточено на глубинах от 4 до 10 км, кроме того наблюдается ярко выраженная приповерхностную сейсмичность от 0 до 1,5 км вдоль всей зоны афтершокового процесса.

Выяснение закономерностей эволюции геоэлектрических параметров, взаимосвязи вариаций УЭС с происходящими сейсмотектоническими процессами, осуществлялось по мере накопления полевых данных ЗС. Визуализация результатов является важным этапом исследования, она позволяет наглядно их представить и облегчает анализ. Способы визуализации постоянно совершенствуются. Здесь всегда нужны конструктивные идеи. В начале работ в 2004 г. были просто сопоставлены кривые кажущегося удельного сопротивления и геоэлектрические модели в результате инверсии полевых данных за 2004 и 1980 гг. для каждого ЗС. Из сопоставления следовало, что после разрушительного землетрясения радикально изменилось УЭС всех горизонтов геоэлектрической модели для большинства ЗС, причем эти изменения были совершенно разными для каждого из них.

Далее на основе измерений за несколько лет были выявлены пункты, наиболее чувствительные к сейсмическим воздействиям. К ним отнесены ЗС 106 и 102 по данным которых получены максимальные вариации УЭС геоэлектрических горизонтов разреза вскоре после события. Для того чтобы сравнить изменения УЭС в разных пунктах, визуализация выполнена в виде графиков относительных вариаций УЭС ($\Delta\rho_2$, $\Delta\rho_3$) двух проводящих горизонтов (рис. 3). Видно, что выделяются две группы графиков, различающиеся уровнем значений УЭС. В частности, в 2004, 2005 гг. по данным ЗС 106, 102 вариации 2-го слоя максимальны, для ЗС 106 они превышают 200%, для ЗС 102 достигают 150–120%. В то время как для ЗС 158 вариации составляют 25–30%, а ЗС 134 слабо реагирует на сейсмические события, для него вариации 2-го слоя незначительны (рис. 3, *а*). Для 3-го слоя закономерности изменений УЭС почти такие же как для 2-го слоя, но амплитуды вариаций меньше для ЗС 106 и 102 и соответственно составляют 50 и 35%, а для ЗС 158, 134 они около 10–12% (рис. 3, *б*).

Совместный анализ временных вариаций УЭС и их сопоставление с параметрами сейсмической активности позволил выя-

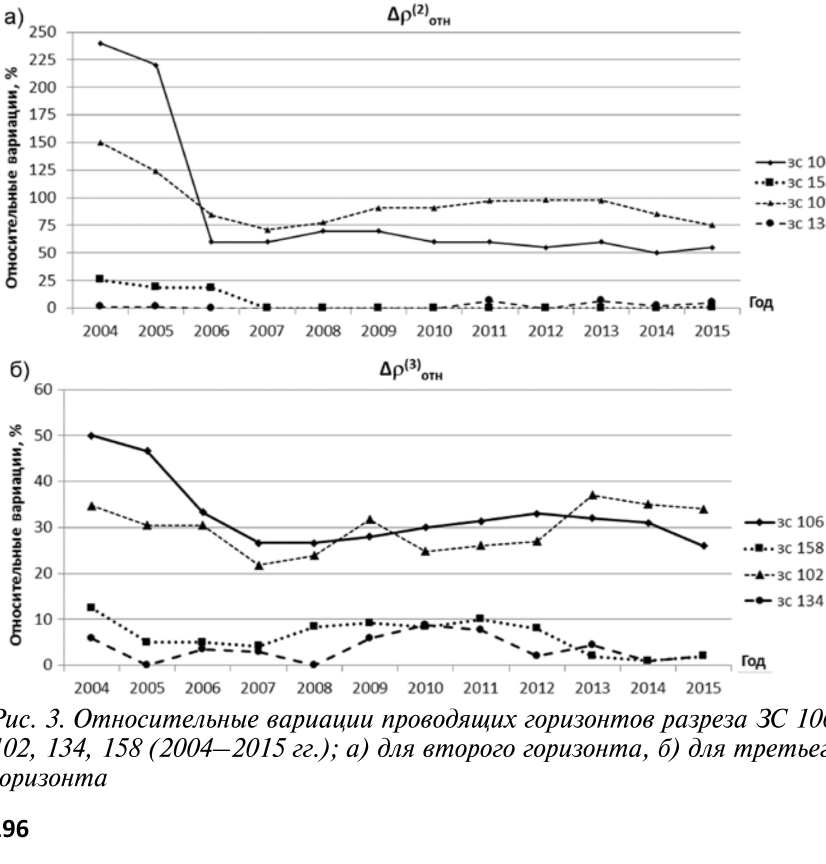

Рис. 3. Относительные вариации проводящих горизонтов разреза ЗС 106, 102, 134, 158 (2004–2015 гг.); а) для второго горизонта, б) для третьего горизонта

вить закономерности их изменений в афтершоковый период. По представленным материалам можно сделать вывод, что в течение первых трех-четырех лет (2004–2007 гг.) наблюдалась тенденция к восстановлению значений УЭС стабильного периода.

Начиная с 2006–2007 г. УЭС проводящих слоев модели в целом изменяется менее интенсивно, и можно считать, что среда находится в новом относительно стабильном геоэлектрическом состоянии, которое нарушают две сейсмические активизации афтершокового периода в 2008–2009 гг. и 2012–2013 гг. (рис. 2, *б, в*). Во время активизаций вариации усиливаются.

Важность знаний о строении участков мониторинга геодинамических процессов отмечается в целом ряде научных публикаций [17, 18, 20, 22]. В частности, в своем обзоре сотрудник Научной станции РАН в Бишкеке В.Е. Матюков отмечает, что прогнозные неудачи связаны с отсутствием увязки результатов мониторинга с геологическим строением участков исследования. Опыт работы авторов в Байкальской рифтовой зоне, Горном Алтае также показал, что необходимо учитывать не только сейсмологические, но и структурные геолого-геофизические данные [9, 21].

В Чуйской впадине параллельно с мониторингом выполняются работы по уточнению строения участка измерений комплексом методов геоэлектрики. По результатам этих работ подтверждено выраженное блоковое строение осадочной толщи и фундамента, пересеченного многочисленными разломами, которые фиксируются его резкими уступами, прослеживаются зонами понижения УЭС фундамента и осадочного заполнения впадины. В целом ряде случаев разломные зоны выражены на поверхности повышенной трещиноватостью и подтверждаются геологическими данными [7, 29, 31]. Принимая во внимание размеры блоков и их разломные ограничения, можно объяснить существенные изменения УЭС в районе одних пунктов и небольшие в других. На первый взгляд, эти изменения разнородны, но прослеживается, что амплитуда вариаций существенно зависит от тектонической структуры, над которой пункт находится. Анализ вариаций УЭС за 2004–2015 гг. с учетом геоэлектрического строения показал, что наблюдается взаимосвязь вариаций электропроводности для каждого конкретного зондирования со структурно-тектоническими особенностями участка, где пункт измерений находится.

Существенно меньшие изменения УЭС по данным ЗС 158 и 134 по сравнению с ЗС 106 и 102 (рис. 3) связаны с несколькими причинами. Для ЗС 158 это объясняется в первую очередь небольшой мощностью проводящего горизонта (около 40 м). В маломощных слоях быстрее восстанавливается гидрогеологический режим и соответственно удельное электрическое сопротивление [16]. Кроме того, оба пункта ЗС 158 и 134 расположены гораздо дальше как от магистрального сейсморазрыва, так и от межблоковых разломов, чем ЗС 106 и 102.

Как уже отмечалось затухание афтершокового периода нарушают мощные сейсмические активизации (рис. 2, *б, в*). В зависимости от взаимного размещения пунктов измерений ЗС и эпицентров землетрясений в периоды активизаций изменяются амплитуды вариаций УЭС. По данным ЗС 106 и 102 имеется реакция на оба периода повышения сейсмической активности Чуйско-Курайской зоны, но для каждого периода она разная.

Во время активизации 2008–2009 гг. наблюдается увеличение амплитуды вариации УЭС 2-го слоя ЗС 106 (до 10%), в 2013 г. вариации меньше (около 5%). Для ЗС 102 наиболее выразительны вариации 3-го слоя, которые в 2009 г. достигают 13% (реакция на общее повышение сейсмичности Чуйско-Курайской зоны), а воздействие на среду сильного землетрясения 24 января 2013 г. (Ms = 6,0) с эпицентром юго-западнее пункта 102 в горах Южно-Чуйского хребта вызвало вариации УЭС в 17% (рис. 3, *б*). Этому землетрясению сопутствовали афтершоки, локализованные в узкой зоне длиной около 20 км, еще более усиливающие сейсмическую активность.

Для ЗС 162, 166, 118, 94 также построены графики относительных вариаций за период измерений. Эти ЗС реагирует на повышение сейсмичности в 2012 г., связанное с сильным зем-

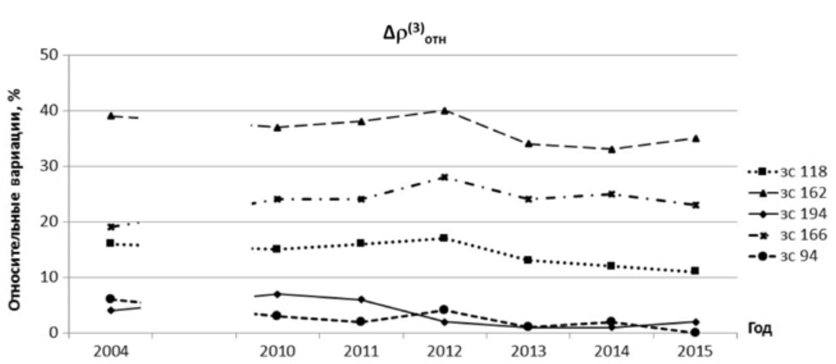

Рис. 4. Относительные вариации УЭС для третьего слоя ЗС 118, 162, 194, 166, 94 за 2004, 2010–2015 гг.

летрясением Ms = 6 в Айгулакском хребте, небольшими аномалиями УЭС третьего слоя разреза в 3–6% (рис. 4). Учитывая тот факт, что измерения выполняются высокоточной современной аппаратурой, с помощью которой измеряют сигналы до долей мкВ (0,3–0,5 мкВ), аномалии в 5% вполне значимы [3].

Данные ЗС, полученные в 2010–2015 гг. в западной части Чуйской впадины, позволяют рассмотреть и сопоставить площадные изменения геоэлектрических параметров, так как в эти годы была повторена большая часть измерений 2004 г. Для этих данных выбрана другая визуализация. Вариации УЭС первого, второго и третьего горизонтов разреза ($\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, $\Delta\rho_3$) были рассчитаны относительно значений, полученных в 80-х годах с учетом знака этих изменений. Уже отмечалось, что для одних ЗС удельное электрическое сопротивление отдельных горизонтов после разрушительного события повышалось, а для других понижалось. Распределение вариаций построено в виде карты изолиний, на которой красным цветом выделены зоны повышения УЭС, а синим – зоны понижения.

Для первого горизонта со сложным литологическим составом, вскоре после события в 2004 г. сопротивление в основном повысилось за исключением аномалии понижения УЭС в районе пунктов ЗС 158 и 162 (см. рис. 5, Приложение). Так как для нескольких ЗС был пропущен пятилетний временной интервал (2005–2009), далее можно отметить, что в 2010, область отрицательной аномалии существенно расширилась, и в следующие годы наблюдаются менее значимые изменения – в среднем 5–7%, о них можно судить по приведенной шкале рис. 5.

Распределение положительных и отрицательных аномалий УЭС второго и третьего осадочных горизонтов разреза ($\Delta\rho_2$, $\Delta\rho_3$) в 2004, 2010, 2012, 2015 гг. показано на рис. 6 *а, б* (см. Приложение). Анализ показал, что имеется несколько ЗС, для которых после землетрясения УЭС 2-го слоя увеличилось, а УЭС 3-го уменьшилось.

УЭС второго горизонта в 2004 г. вскоре после события в основном возросло (аналогично первому слою) и понизилось только в районе пункта ЗС 158. По данным ЗС 102, 118, 106 все значения УЭС 2-го слоя после события возросли максимально на 150–200%. В 2010 г. наблюдается небольшая отрицательная аномалия в районе пунктов ЗС 162 – ЗС 194, а в районе пунктов ЗС 102 и 118 $\Delta\rho_2$ снижается до 160%. В течение последующих четырех лет с 2011 г. по 2015 г. УЭС 2-го горизонта практически стабилизируется, о чем также можно судить по цветовой шкале. Можно сделать вывод, что после Чуйского землетрясения УЭС 2-го слоя в основном значительно возросло и в течение афтершокового периода остается повышенным относительно стабильного состояния 80-х гг., за исключением области на севере участка (ЗС 158, 162, 194, 134), где УЭС вернулось к его значениям до события.

Третий горизонт является наиболее проводящим, интервал значений УЭС для него относительно небольшой и составлял 8–27 Ом·м до разрушительного события и 6–33 Ом·м после. Для этого слоя изменения УЭС, связанные с землетрясением, хорошо соотносятся с блоками, над которыми пункты расположены. Напомним, что механизм Чуйского землетрясения определен как правый сдвиг, на рис. 5, 6 показана линия магистрального разрыва. По данным ЗС 102 и 118 (юго-западный блок) в 2004 г. значения УЭС увеличились (до 35%), для всех остальных ЗС (северо-восточный блок) они уменьшились. Это уменьшение максимально по данным ЗС 106 и 162 (до 45%). Имеются «нейтральные» ЗС (134, 194, 94), по данным которых УЭС изменялось незначительно и соответственно имеется зона минимальных вариаций УЭС третьего горизонта на северо-востоке участка. Кроме того, по распределению $\Delta\rho_3$ в 2004 г. хорошо видно, что магистральный разрыва Чуйского землетрясения разделяет области с разным знаком изменения УЭС. Похожие закономерности наблюдались по данным других геофизических методов: тектономагнитного, гравиметрического и др. [11].

Площадные распределения несут новую информацию об изменениях геоэлектрических параметров. В частности, наглядно показано, что от сейсмического воздействия совершенно по-разному изменяются геоэлектрические параметры среды осадочных горизонтов. Для большей части территории участка после события для второго слоя УЭС повысилось, а для третьего понизилось. Магистральный разрыв Чуйского хорошо проявляется только в распределении вариаций третьего слоя на глубинах около 500 м, фактически совпадая с границей аномалий УЭС разного знака в 2004 г. (вскоре после землетрясения). Далее зона положительной аномалии уменьшается в размерах и, начиная с 2013 г., она находиться в районе пункта ЗС 102 и в течение 2014–2015 гг. ее размер практически не изменяется.

Процесс интерпретации геофизических данных в соответствии с современными научными тенденциями развиваться по пути усложнения моделей [36]. Построение трехмерных моделей актуально при обработки данных регулярных электромагнитных наблюдений, так как одной из главных идей является полный учет особенностей строения. Для обоснования геоэлектрических моделей Чуйской впадины уже выполнено трехмерное моделирование для сложно-построенных участков [25]. Именно трехмерные модели отражают пространственное распределение геоэлектрических параметров и позволяют выделить объем среды, максимально реагирующий на сейсмические события. Построение таких моделей за несколько лет (учет временной координаты) будет наглядно отражать динамику изменений геоэлектрических параметров.

По данным мониторинга ЗС в западной части Чуйской впадины построены 3Д модели, по которым можно судить о пространственном распределении вариаций афтершокового периода (см. рис. 7, Приложение). Модели представлены в виде срезов на глубинах, соответствующих кровле каждого осадочного слоя. Значения изолиний отражают интенсивность относительных вариаций УЭС по абсолютной величине. Можно видеть, что в 2004 г. вскоре после землетрясения геоэлектрические параметры среды изменились глобально на всех глубинах. В частности, для первого слоя вариации достигали 100–120%, причем в северо-восточной части планшета. Во втором горизонте (глубины 200–350 м) наблюдались наиболее значимые вариации, максимальные изменения УЭС получены в южной части планшета в районе пунктов 102, 118, 106. Эти пункты находятся в зоне влияния магистрального разрыва. Для третьего горизонта относительные вариации УЭС меньше, чем в двух верхних слоях, они составляют 40–50%. Кроме того, в модели 2004 г. для всех горизонтах выделяются области, где УЭС после события изменилось незначительно (ЗС 134, 162 в первом и втором слое), в третьем слое эта область больше и занимает юго-западную часть планшета (рис. 7, *а*). Рассмотрение гидрогеологических данных свидетельствует о глобальном перераспределении поровых и пластовых вод Чуйского артезианского бассейна, что привело к таким значимым изменениям УЭС осадочных горизонтов [16].

Если сопоставить модель в год сейсмической активизации 2013 г. и модель 2015 г., в котором по оперативным сейсмологическим данным наблюдался более низкий уровень сейсмичности, видно, что на землетрясения 2013 г. в Южно-Чуйском хребте реагирует среда на глубинах третьего горизонта в районе пунктов ЗС 102, 106, наиболее близко расположенных к эпицентру землетрясения (рис. 7, *в, г*). Здесь следует отметить, что в 2010 г. сейсмичность самая низкая и большая их часть сосредоточена в зоне магистрального разрыва, а в 2012, 2013 гг. сейсмический процесс как бы расплывается и развивается на северо-западе и на юге Чуйско-Курайской зоны [14, 15].

Выводы

1. Пространственно-временное распределение УЭС и его вариации получены на основе решения обратной задачи с использованием программно-алгоритмических комплексов моделирования и инверсии. Показаны преимущества такого подхода.

2. Анализ данных мониторинга выполнялся с учетом геологического строения полигона и с привлечением опубликованных сейсмологических данных.

3. Показано глобальное изменение УЭС горных пород вскоре после Чуйского события, значимые вариации в течение 2005–2006 гг. и имеющаяся реакция на сейсмические активизации 2008–2009 гг. и 2012–2013 гг.

4. По результатам интерпретации данных ЗС за 2004–2015 гг. в западной части Чуйской впадины выявлены особенности изменения удельного электрического сопротивления массива горных пород, нарушенного катастрофическим землетрясением: первые три года после события наблюдается тенденция к восстановлению значений УЭС стабильного периода, а далее вариации отражают текущую сейсмичность.

5. Интенсивность вариаций УЭС зависит от литологического состава геоэлектрического горизонта, его мощности, временного интервала измерений и места расположения пункта ЗС, т.е. от его структурных особенностей. Максимальная реакция на сильное сейсмические воздействия получена для пунктов, расположенных в зонах магистрального разрыва Чуйского землетрясения и межблоковых разломов (ЗС 106, 102, 118). Это следует учитывать при постановке новых пунктов измерений.

6. Временные вариации УЭС в период 2004–2015 гг. указывают на длительный афтершоковый процесс Чуйского землетрясения. хорошо коррелируют с показателями сейсмических активизаций и могут являться их индикатором.

Заключение

Проблема прогнозирования сейсмических событий относится к одной из наиболее сложных в геофизике. В настоящее время не наблюдается значительных достижений в этой области, нет единой стратегии исследований. Тем не менее, можно полагать, что прогноз тектонического события (природного или техногенного) все-таки возможен, основанием для этого служит тот факт, что землетрясение не внезапно и существует целый ряд предвестников, свидетельствующих о его подготовке в данном объеме среды. Известный геофизик И.П. Добровольский считает, что для успешного прогноза следует изучать сопутствующие явления и строить сценарий подготовки очага землетрясения [10, 18].

Натурными и модельными исследованиями ряда исследователей установлено, что электромагнитное поле имеет высокую чувствительность к воздействию геодинамических процессов, которая проявляется в вариациях геоэлектрических параметров. Это обусловливает возможность использования электромагнитных методов для наблюдения за состоянием геологической среды сейсмоактивных районов [34].

Появление современных аппаратурных разработок метода ЗС, позволяющих измерять слабые сигналы в доли мкВ, а также более совершенных программно-алгоритмических средств обработки и интерпретации дает возможность получать точные полевые данные электромагнитного мониторинга, эффективно их интерпретировать с последующим использованием результатов для характеристики изменений напряжённо-деформированного состояния среды и формирования прогнозных критериев. Выявленная реакция электромагнитных полей на сейсмические активизации афтершокового периода дает основание полагать, что можно получить изменения УЭС при наличии форшоковой активности в период подготовки сейсмического события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авагимов А.А.* Динамика электромагнитных процессов в Копетдагском сейсмоактивном районе. Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. – М., 1991. – 52 с.

2. *Еманов А.Ф. и др.* Афтершоковый процесс Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. / Динамика физических полей Земли. – М.: Светоч Плюс, 2011. – С. 173–185.

3. *Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н.* Возможности методов электроразведки с контролируемым источником в нефтеносных районах Сибирской платформы / Первая международная конференция «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем» 27–30 сентября 2009 г. Киев. – Киев, 2009. – С. 30–31.

4. *Барсуков О.М.* О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Известия Ан СССР, Физика Земли. – 1970. – № 1. – С. 84–89.

5. *Баталева Е.А.*, *Баталев В.Ю.*, *Рыбин А.К.* К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 105–113.

6. *Высоцкий Е.М. Новиков И.С.*, *Агатова А.Р.*, *Деев Е.В.*, *Скобелицин Г.А.*, *Макарова Д.Д.* Строение зоны поверхностных деформаций Чуйского землетрясения 2003 года (Горный Алтай) / Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования: Материалы XXVIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2004. – С. 65–67.

7. *Деев Е.В. и др.* Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 1. – С. 120–139.

8. *Гольдин С.В.*, *Селезнев В.С.*, *Еманов А.Ф.* Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады РАН. – 2004. – Т. 395. – № 4. – С. 1–4.

9. *Дашевский Ю.А.*, *Неведрова Н.Н.*, *Жирова Н.В.* Интегральная проводимость разреза как индикатор напряженного состояния среды при активном электромагнитном мониторинге на Южно-Байкальском прогностическом полигоне // Доклады РАН. – 2000. – Т. 370. – № 6. – С. 807–809.

10. *Добровольский И.П.* О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 35–46.

11. *Дядьков П.Г.*, *Кучай О.А.*, *Михеева А.В.*, *Романенко Ю.М.* Стадии подготовки Алтайского землетрясения (27.09.2003 г., M = 7,3) и связанные с ними изменения состояния сейсмогенной среды // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № S1. – С. 78–82.

12. Землетрясения России в 2005 г. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – 180 с.

13. Землетрясения России в 2012 г. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – 224 с.

14. Землетрясения России в 2013 г. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – 224 с.

15. Землетрясения России в 2014 г. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – 206 с.

16. *Кац В.Е.* Гидрогеологические особенности состояния подземных вод на территории Республики Алтай в 2004 г. (после Чуйского землетрясения) // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2005. – № 2. – С. 61–65.

17. *Киссин И.Г.* Новые данные о чувствительных зонах земной коры и формирование предвестников землетрясений и постсейсмических эффектов // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 548–565.

18. *Киссин И.Г.* О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 145–160.

19. *Лескова Е.В.*, *Еманов А.А.* Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 г. // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 1. – С. 113–123.

20. *Матюков В.Е.* Практические результаты электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон (обзор) // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 15–23.

21. *Неведрова Н.Н.* Взаимосвязь вариаций электропроводности с тектоническим строением района исследований / Материалы двенадцатого Всероссийского семинара «Геодинамика. Геомеханика и гео-

физика» (Стационар «Денисова пещера, Алтайский край. 23–28 июля 2012 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН. – 2012. – С. 11.

22. *Неведрова Н. Н.*, *Эпов М. И.* Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34. – № 4. – С. 209–223.

23. *Неведрова Н. Н.*, *Шалагинов А. Е.* Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31–40.

24. *Неведрова Н. Н. и др.* Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 9. – С. 1399–1416.

25. *Санчаа А. М.*, *Суродина И. В.*, *Власов А. А.*, *Неведрова Н. Н.*, *Сафиуллина А. А.* Подходы к составлению трехмерной геоэлектрической модели для численных расчетов / Материалы международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2015» (АПВПМ–2015), посвященной 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. Новосибирск. 19–24 октября 2015 г. – CD-ROM.

26. *Светов Б. С.* Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Известия вузов. Геология и разведка. – 1992. – Т. 12. – С. 99–115.

27. *Сидорин А. Я.* Предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1992. – 192 с.

28. *Хабинов О. Г. и др.* Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS / ГЕО-Сибирь-2009: сборник научых статей. – Новосибирск, 2009. – С. 108–113.

29. *Буслов М. М. и др.* Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозое // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 12. – С. 1720—1736.

30. *Еманов А. Ф. и др.* Чуйское землетрясение 27 сентября 2003 года с Ms = 7,3, Kp = 17 (Горный Алтай) / Землетрясения Северной Евразии в 2003 г. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 326–343.

31. *Шалагинов А. Е.*, *Неведрова Н. Н.* Геоэлектрическое строение участка регулярных наблюдений за электромагнитными параметрами в Чуйской впадине Горного Алтая // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 2. – С. 310–318.

32. *Эпов М. И.*, *Дашевский Ю. А.*, *Ельцов И. Н.* Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований: препр. № 3. – Новосибирск: Изд. ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, 1990. – 29 с.

33. *Lunina O. V.*, *Gladkov A. V.*, *Novikov I. S.*, *Agatova A. R.*, *Vysotskii E. M.*, *Emanov A. A.* Geometry of the fault zone of the 2003 Ms = 7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics, 2008. V. 453. P. 276–294.

34. *Qian J.* Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M-7.8, 1976) in China // Pageoph. 1984/1985. – Vol. 122. – P. 901–920.

35. *Stanica D.*, *Stanica M.* Electromagnetic monitoring in geodynamic active areas // Acta Geodyn. Geomater. – 2007. – Vol. 4. – No 1. – Pp. 99–107.

36. *Zhdanov M. S.*, *Wannamaker P. E.* Three-dimensional electromagnetics. — Amsterdam: Elsevier, 2002. — 290 p.

37. *Varotos P.*, *Aleccxopoulos M.* Earthquake Predictions Issued in Greece 1990 // Tectonophysics. — 1993b. — № 224. — Pp. 269—288.

38. *Wright D. L.*, *Ziolkowski A.*, *Hobbs B.* Hydrocarbon detection and monitoring with a multicomponent transient electromagnetic (MTEM) survey // The Leading Edge. — 2002. — No. 21. — Pp. 852—864.

39. www.usgs.gov.

40. www.globalcmt.org ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Неведрова Нина Николаевна[1,2] — доктор геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru,
Рохина Марина Геннадьевна[1] — инженер,
e-mail: RohinaMG@ipgg.sbras.ru,
Шалагинов Александр Евгеньевич[1] — научный сотрудник,
e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru,
Санчаа Айдиса Михайловна[1] — кандидат геолого-минералогических наук, ученый секретарь, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru,
[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения РАН,
[2] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 550.837+ 551.248.2

N.N. Nevedrova, M.G. Rokhina, A.E. Shalaginov, A.M. Sanchaa

ANALYSIS OF LONG-TERM OBSERVATIONS BY METHOD OF NON-STATIONARY ELECTROMAGNETIC SOUNDING (ON THE EXAMPLE OF THE SEISMOACTIVE ZONE GORNY ALTAI)

The process of earthquake preparation is not quite clear as well as a process of Earth's mineral regeneration after disastrous actions. The stress-strain state of geological segment evolution at the epicentral zone of the destructive Chuya earthquake 2003 (Mw = 7.3) is explored in this article by the results of analysis of monitoring field measurements by TEM-soundings. The measurements are executed in the number of points which are in the Western part of Chuya valley in Gorny Altai. The field works were being continued for 12 years (2004–2015). The analysis is aimed to determine the correlation of mineral electrical resistivity variations and existent seismotectonic processes with the consideration of geological structure and seismic data. The interpretation of field TEM-data is based on the solving of the inverse problem. To calculate variations the mineral geoelectrical parameters have been estimated according to the previous century data in the period of low seismic activity. The comparison of the results of the quantitative interpretation of measurements executed nowadays and before Chuya earthquake allows to explore changes of the section geoelectrical parameters

immediately after Chuya event and ever in the aftershock period to characterize the evolution of the medium.

Key words: TEM-sounding, monitoring measurements, variations of electrophysical parameters, Gorny Altai, Chuya earthquake 2003.

AUTHORS

Nevedrova N.N.[1,2], Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,
Assistant Professor, Leading Researcher,
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru,
Rokhina M.G.[1], Engineer, e-mail: RohinaMG@ipgg.sbras.ru,
Shalaginov A.E.[1], Researcher, e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru,
Sanchaa A.M.[1], Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Scientific Secretary, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru,
[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090, Novosibirsk, Russia,
[2] Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 15-35-20614 (mol_a_ved).

REFERENCES

1. Avagimov A.A. *Dinamika elektromagnitnykh protsessov v Kopetdagskom seysmoaktivnom rayone* (Dynamics of electromagnetic processes in seismically active region of the Kopetdag), Doctor's thesis, Moscow, 1991, 52 p.

2. Emanov A.F. *Dinamika fizicheskikh poley Zemli* (Dynamics of physical fields of the Earth), Moscow, Svetoch Plyus, 2011, pp. 173–185.

3. Babushkin S.M., Nevedrova N.N. *Pervaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Aktual'nye problemy elektromagnitnykh zondiruyushchikh sistem»* 27–30 sentyabrya 2009 g., Kiev (Current Problems of Electromagnetic Probing Systems: I International Conference Proceedings, 27–30 September 2009, Kiev), Kiev, 2009, pp. 30–31.

4. Barsukov O.M. *Izvestiya An SSSR, Fizika Zemli*. 1970, no 1, pp. 84–89.

5. Bataleva E.A., Batalev V.Yu. *Fizika Zemli*. 2013, no 3, pp. 105–113.

6. Vysotskiy E.M. Novikov I.S., Agatova A.R., Deev E.V., Skobelitsin G.A., Makarova D.D. *Rel'efoobrazuyushchie protsessy: teoriya, praktika, metody issledovaniya: Materialy XXVIII Plenuma Geomorfologicheskoy komissii RAN* (Terrain-Forming Processes—Theory, Practice, Research Methods: XXVII Plenary Section Proceedings of the Geomorphology Commission of the Russian Academy of Sciences), Novosibirsk, OIGGM SO RAN, 2004, pp. 65–67.

7. Deev E.V. *Geologiya i geofizika*. 2012, pp. 53, no 1, pp. 120–139.

8. Gol'din S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F. *Doklady RAN*. 2004, pp. 395, no 4, pp. 1–4.

9. Dashevskiy Yu.A., Nevedrova N.N., Zhirova N.V. *Doklady RAN*. 2000, pp. 370, no 6, pp. 807–809.

10. Dobrovol'skiy I.P. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2010, pp. 11, no 1, pp. 35–46.

11. Dyad'kov P.G., Kuchay O.A., Mikheeva A.V., Romanenko Yu.M. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2010, pp. 13, no S1, pp. 78–82.

12. *Zemletryaseniya Rossii v 2005 g.* (Earthquakes of Russia in 2005), Obninsk, GS RAN, 2007, 180 p.

13. *Zemletryaseniya Rossii v 2012 g.* (Earthquakes of Russia in 2012), Obninsk, GS RAN, 2014, 224 p.

14. *Zemletryaseniya Rossii v 2013 g.* (Earthquakes of Russia in 2013), Obninsk, GS RAN, 2015, 224 p.

15. *Zemletryaseniya Rossii v 2014 g.* (Earthquakes of Russia in 2014), Obninsk, GS RAN, 2016, 206 p.

16. Kats V. E. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*. 2005, no 2, pp. 61–65.

17. Kissin I. G. *Geologiya i geofizika*. 2007, pp. 48, no 5, pp. 548–565.

18. Kissin I. G. *Fizika Zemli*. 2013, no 4, pp. 145–160.

19. Leskova E. V., Emanov A. A. *Geologiya i geofizika*. 2013, pp. 54, no 1, pp. 113–123.

20. Matyukov V. E. *Vestnik KRSU*. 2011, pp. 11, no 4, pp. 15–23.

21. Nevedrova N. N. *Materialy dvenadtsatogo Vserossiyskogo seminara «Geodinamika. Geomekhanika i geofizika»* (Statsionar «Denisova peshchera, Altayskiy kray. 23–28 iyulya 2012 g. (Geodynamics, Geomechanics and Geophysics: XII All-Russian Seminar Proceedings (Denisova Peshchera Resort, Altai, July 23–28, 2012)), Novosibirsk, INGG SO RAN, 2012, pp. 11.

22. Nevedrova N. N., Epov M. I. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2012, pp. 34, no 4, pp. 209–223.

23. Nevedrova N. N., Shalaginov A. E. *Geofizika*. 2015, no 1, pp. 31–40.

24. Nevedrova N. N. *Geologiya i geofizika*. 2001, pp. 42, no 9, pp. 1399–1416.

25. Sanchaa A. M., Surodina I. V., Vlasov A. A., Nevedrova N. N., Safiullina A. A. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki 2015» (APVPM–2015), posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya akademika G.I. Marchuka,* Novosibirsk, 19–24 oktyabrya 2015 g. (Current Challenges of Computational and Applied Mathematics–2015: International Conference Proceedings, Novosibirsk, 19–24 October 2015), CD-ROM.

26. Svetov B. S. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 1992, pp. 12, pp. 99–115.

27. Sidorin A. Ya. *Predvestniki zemletryaseniy* (Earthquake precursors), Moscow, Nauka, 1992, 192 p.

28. Khabinov O. G. *GEO-Sibir'-2009: sbornik nauchnykh statey* (GEO-Sibir2009: collection of scientific articles), Novosibirsk, 2009, pp. 108–113.

29. Buslov M. M. *Geologiya i geofizika*. 1999, pp. 40, no 12, pp. 1720—1736.

30. Emanov A. F. *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii v 2003 g.* (Earthquakes in Northern Eurasia in 2003), Obninsk, GS RAN, 2009, pp. 326–343.

31. Shalaginov A. E., Nevedrova N. N. *Vestnik altayskoy nauki*. 2015, no 2, pp. 310–318.

32. Epov M. I., Dashevskiy Yu. A., El'tsov I. N. Avtomatizirovannaya interpretatsiya elektromagnitnykh zondirovaniy (Automated interpretation of electromagnetic probing data), Novosibirsk, Izd. in-ta geologii i geofiziki SO AN SSSR, 1990, 29 p.

33. Lunina O. V., Gladkov A. V., Novikov I. S., Agatova A. R., Vysotskii E. M., Emanov A. A. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms = 7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, 2008. V. 453. Pp. 276–294.

34. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M-7.8, 1976) in China. *Pageoph*. 1984/1985. Vol. 122. P. 901–920.

35. Stanica D., Stanica M. Electromagnetic monitoring in geodynamic active areas. *Acta Geodyn. Geomater*. 2007. Vol. 4. No 1. Pp. 99–107.

36. Zhdanov M. S., Wannamaker P. E. *Three-dimensional electromagnetics*. Amsterdam: Elsevier, 2002, 290 p.

37. Varotos P., Aleccxopoulos M. Earthquake Predictions Issued in Greece 1990. *Tectonophysics*. 1993b, no 224. Pp. 269–288.

38. Wright D. L., Ziolkowski A., Hobbs B. Hydrocarbon detection and monitoring with a multicomponent transient electromagnetic (MTEM) survey. *The Leading Edge*. 2002. No. 21. Pp. 852–864.

39. www.usgs.gov.

40. www.globalcmt.org.

ПРИЛОЖЕНИЕ

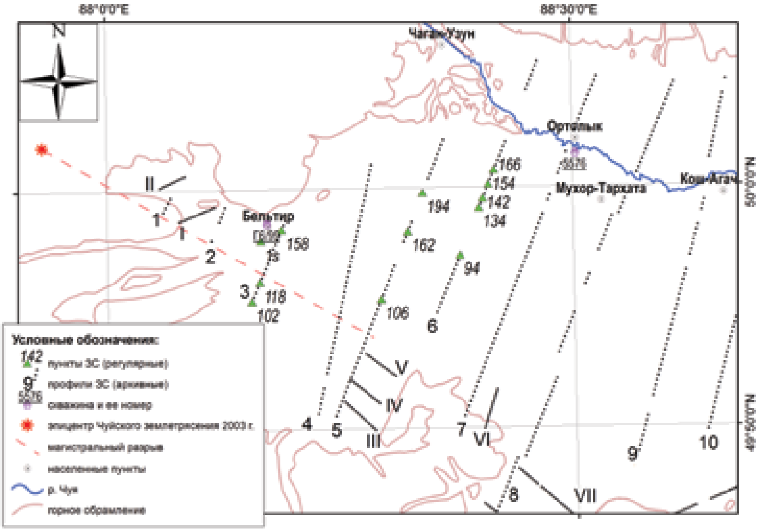

Рис. 1. Схема расположения пунктов регулярных измерений методом ЗС с соосными петлями в западной части Чуйской впадины Горного Алтая

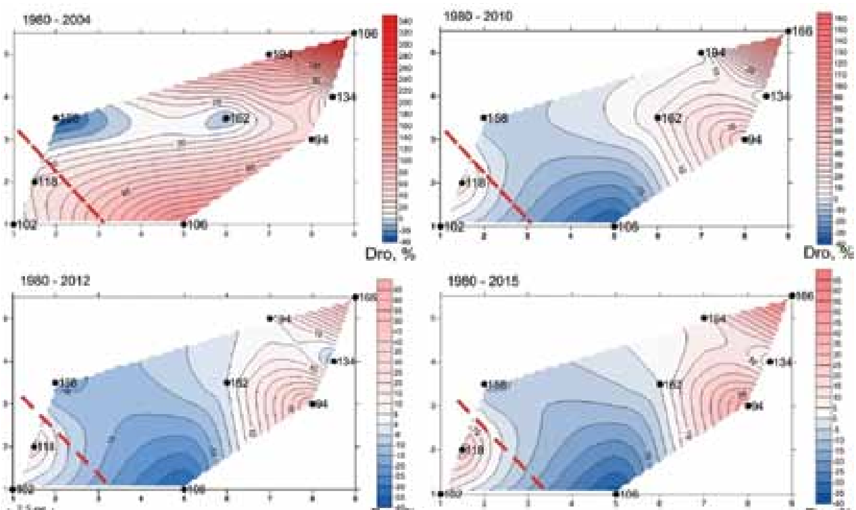

Рис. 5. Относительные площадные изменения удельного электрического сопротивления первого горизонта разреза ($\Delta\rho_1$) с учетом знака в афтершоковый период Чуйского землетрясения

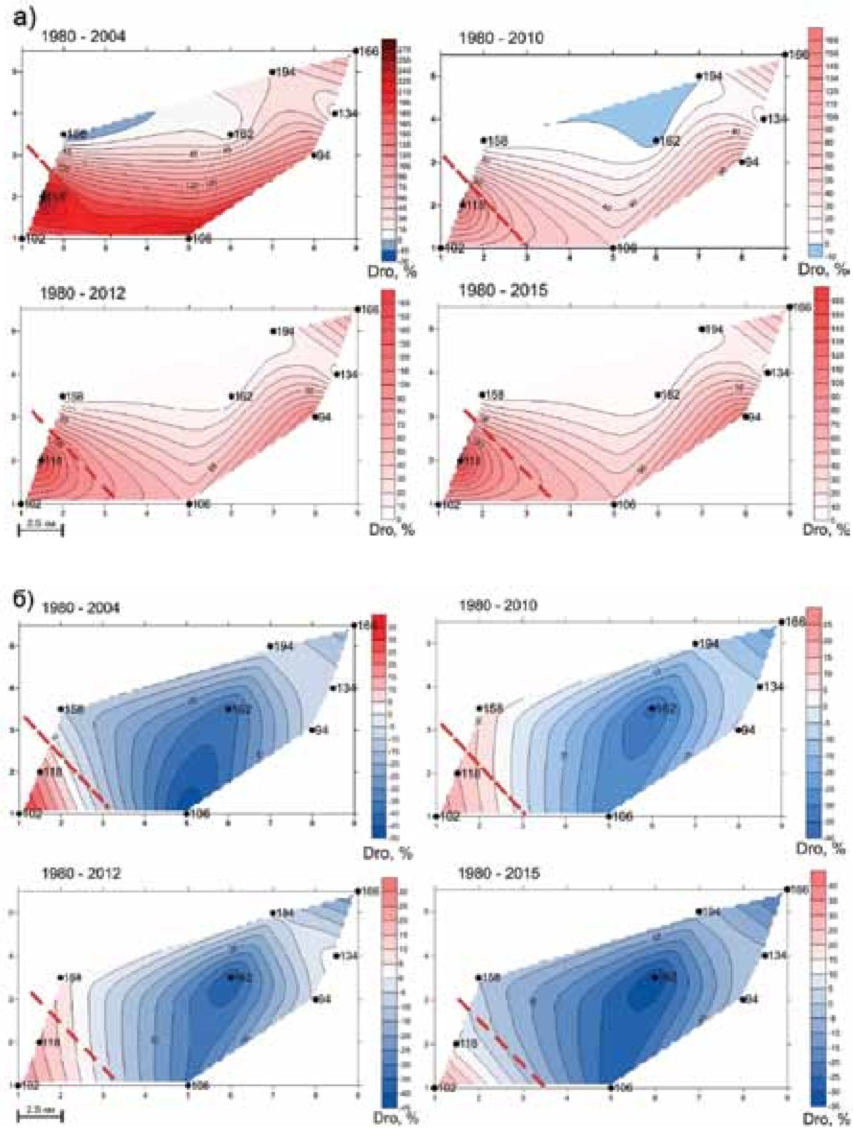

Рис. 6. Площадные изменения $\Delta\rho 2$*,* $\Delta\rho 3$ *для двух наиболее проводящих горизонтов разреза после Чуйского землетрясения на глубинах более 300 м в 2004, 2010, 2012, 2015 гг: а) для 2-го слоя, б) для 3-го слоя*

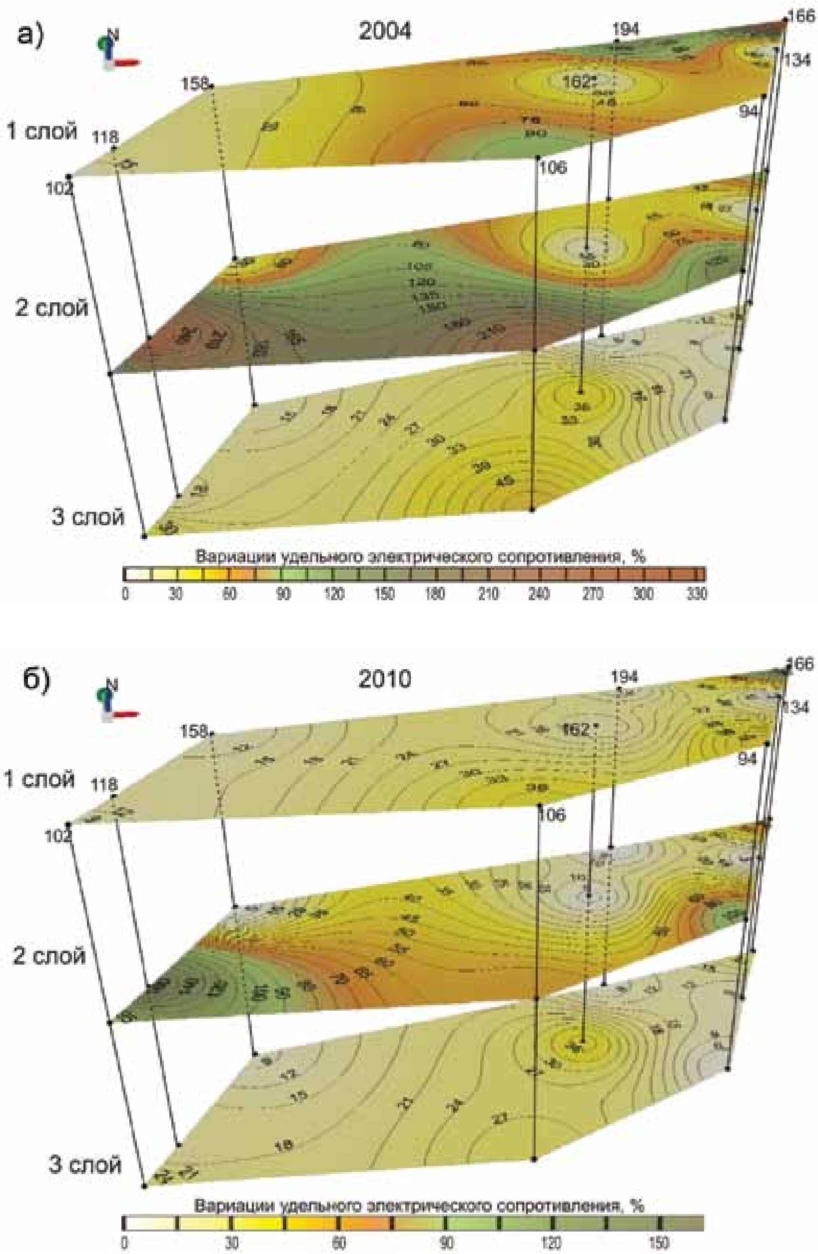

Рис. 7. Трехмерные модели западной части Чуйской впадины в разные годы измерений: а) 2004 г., б) 2010 г., в) 2013 г., г) 2015 г.

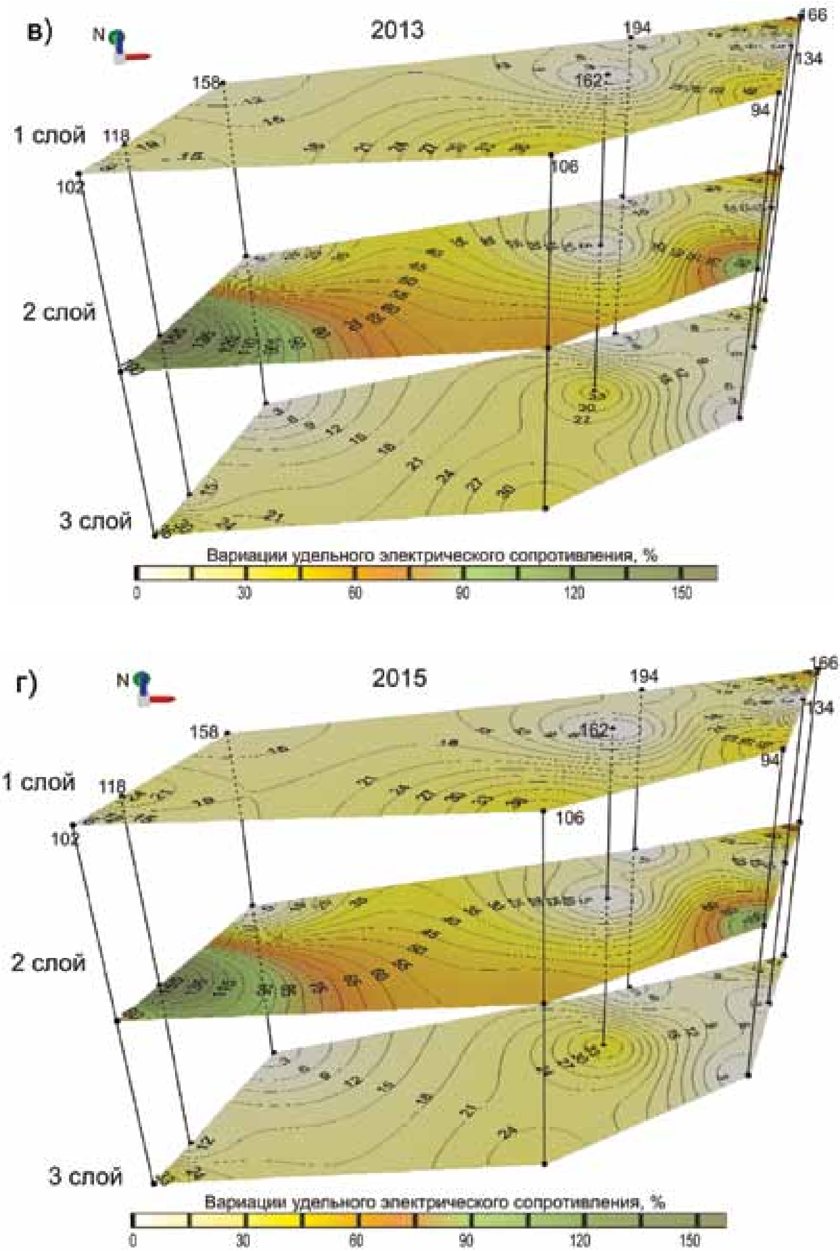

Рис. 7. Трехмерные модели западной части Чуйской впадины в разные годы измерений: а) 2004 г., б) 2010 г., в) 2013 г., г) 2015 г.