

## Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири

© Н. Н. Неведрова, М. И. Эпов, 2012

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Поступила 7 мая 2012 г.

*Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко*

Польові дані електромагнітного моніторингу з контрольованим джерелом отримано у двох сейсмоактивних районах Сибіру. Продемонстровано підхід до інтерпретації даних режимних спостережень і зроблено спробу пояснити варіації електромагнітних параметрів, зумовлені геодинамічними процесами, з урахуванням особливостей нетектонічної будови. Для території Байкальського прогностичного полігону, розташованого на південно-західному березі оз. Байкал, наведено геоелектричні характеристики основних сейсмогенеруючих структур, розломних порушень. Проаналізовано результатів інтерпретації моніторингових вимірювань на постійному струмі в режимному пункті ВЕЗ і обґрунтовано їх зв'язок з геоелектричною будовою; визначено чутливість установки ВЕЗ. На Алтайському геодинамічному полігоні вимірювання виконано комплексом електромагнітних методів (ВЕЗ, ЗС у кількох модифікаціях). Дослідження спрямовано на вивчення будови і варіацій електропровідності, пов'язаних з руйнівним Чуйським землетрусом і розвитком афтершокового процесу. Розглянуто інтерпретацію режимних даних ЗС з індуктивним джерелом. На основі комплексного геолого-геофізичного аналізу результатів описано процеси консолідації геологічного масиву, порушеного сильною сейсмічною дією.

Field data of the electromagnetic monitoring of controlled source have been obtained in two seismically active regions of Siberia. The article demonstrates an approach to the interpretation of regime observations data and it attempts to explain the variation of the electromagnetic parameters due to geodynamic processes, taking into account the peculiarities of the nontectonic structure. For the territory of the Baikal polygon, which is located on the southwestern shore of the Baikal Lake, geoelectric characteristics of the main seismogenic structures and fault disturbances have been provided. The analysis of monitoring measurements interpretation at constant current in the regime point VES has been presented and the relationship with the geoelectric structure has been proved; the sensitivity of the VES setting was determined. In the Altai geodynamic polygon the measurements were conducted by a complex of electromagnetic methods (VES, TEM in several modifications). The investigations were aimed at the study of a structure and variations of electrical conductivity associated with the devastating Chui earthquake and development of aftershock process. Interpretation of the regime TEM data with an inductive source has been considered. On the basis of the complex geologo-geophysical analysis the processes of geological array consolidation disturbed by the strong seismic influence have been described.

**Введение.** Геоэлектрические исследования выполнены в двух сейсмоактивных регионах России — Байкальской рифтовой зоне и Алтае-Саянской горной области. Поставленные задачи относятся к фундаментальной проблеме изучения и прогнозирования напряженного состояния земных недр. Несмотря на дискуссионность проблемы, она остается актуальной не только для сейсмоактивных регионов, но и для различных территорий с выраженными техногенными воздействиями на окружающую среду, с экологически опасными производствами. Существует диаметрально противоположные мнения о возможности прогнозирования

сейсмических событий: от негативных до оптимистических. По большому счету это свидетельствует о крайней сложности проблемы и о том, что пока нет единого подхода к ее решению. В поддержку оптимистического направления можно привести следующую цитату из книги И. П. Добровольского: «Принципиальная возможность прогноза основывается на факте **не внезапности землетрясения**, а существования периода подготовки, проявляющегося в предвестниках» [Добровольский, 1991]. Многочисленность известных предвестников, их насчитывается несколько сотен [Соболев, 1993], отражает, скорее всего, индивидуальность их

набора для каждого отдельного сценария подготовки сейсмического события. Сам же сценарий, по мнению авторов этой статьи, зависит в наибольшей степени от особенностей строения сейсмоактивной зоны и физико-геологических характеристик горных пород ее слагающих.

Опыт обработки и анализа данных электромагнитного мониторинга показал, что необходимы детальные знания о строении исследуемого участка, его тектонических особенностях, разломных нарушениях, для того чтобы понять и оценить степень воздействия сейсмотектонических процессов на физические параметры геологического массива горных пород. Поэтому исследования методами электроразведки на прогностических полигонах были направлены в первую очередь на изучение геоэлектрического строения, а данные режимных наблюдений анализировались с учетом его особенностей. На обоих полигонах использованы методы активного электромагнитного мониторинга. Под этим термином понимают повторяемые с определенной периодичностью систематические наблюдения за электромагнитным полем, создаваемым контролируруемыми источниками, с целью выявления временной динамики электрических свойств изучаемого массива горных пород [Светов, 1992]. Использование активных методов объясняется известными параметрами источника, высокой точностью измерений, а также хорошо разработанной теоретической, программно-алгоритмической интерпретационной базой.

В мире существует всего несколько полигонов, на которых накоплены экспериментальные данные многолетних измерений электромагнитных полей. Рассмотрим кратко полигоны на постсоветском пространстве. Анализ результатов на Гармском, Ашхабадском, Бишкекском полигонах позволяет говорить о перспективности применения активных электромагнитных методов для изучения реакции геологической среды на геодинамические процессы. Электромагнитные предвестники сейсмических событий для этих полигонов достаточно подробно описаны во многих научных статьях и их существование не вызывает сомнений [Bragin et al., 1992; Журавлев и др., 1998; Авагимов и др., 2005]. Впервые регулярные измерения методами электроразведки постоянным током для слежения за сейсмическим режимом применили на Гармском полигоне в Таджикистане. Была зафиксирована определенная закономерность — наблюдалось понижение кажущегося удельного сопротивления ( $\rho_k$ ) горных пород

перед сейсмическими событиями. Это явление связывали с увеличением порового давления в массиве горных пород при подготовке землетрясения. Были выполнены расчеты, которые свидетельствуют, что с увеличением порового давления создаются благоприятные условия для возникновения разрывов в среде [Барсуков, Сорокин, 1973]. На полигоне в Бишкеке за период исследований неоднократно наблюдались локальные вариации кажущегося сопротивления индуктивных методов ( $\rho_t$ ), которые в большинстве случаев коррелировали с близкими землетрясениями. Отмечалось опять же уменьшение значений  $\rho_t$ , начинающееся за 2—3 месяца до землетрясения и быстро возвращающееся после него к исходному уровню [Рыбин, 2011]. Из анализа данных Ашхабадского прогностического полигона следует, что изменения  $\rho_t$  характеризуют деформационный процесс в непосредственной близости от пунктов наблюдения в обводненной зоне разлома и надвинутом клине высокоомных пород, сама же структура отражает геодинамический процесс в более обширной сейсмогенерирующей области [Авагимов и др., 2005].

Если обратиться к Байкальскому электромагнитному полигону, то за время исследований для него получены детальные геоэлектрические модели в широком диапазоне глубин, характеристики разломных нарушений [Мандельбаум и др., 1996 а; Неведрова и др., 2004]. Для обработки экспериментального материала электромагнитного мониторинга был применен новый подход, основанный на решении обратных задач. В лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН была разработана автоматизированная система интерпретации временных рядов электромагнитных зондирований. В результате интерпретации получены количественные оценки вариаций истинных геоэлектрических параметров характерной формы, предвещающие сейсмические события [Дашевский и др., 2000].

На территории Горного Алтая регулярные наблюдения методами электрических и стационарных электромагнитных зондирований (ВЭЗ, ЗС) сосредоточены на нескольких участках эпицентральной зоны разрушительного Чуйского землетрясения. Измерения были начаты в 2004 г. и продолжают в настоящее время. Каждый год выполняются новые измерения методами ВЭЗ и ЗС для уточнения строения. Кроме того, существует целый ряд режимных пунктов, измерения в которых повторяются ежегодно различными методами электрораз-

ведки. Для исследования используется значительный объем фондовых материалов ВЭЗ и ЗС, полученных на территории Алтайских впадин (Чуйской, Курайской) во второй половине прошлого века до Чуйского землетрясения. Кроме установок с индуктивным возбуждением для нестационарных режимных зондирований были опробованы модификации метода с гальваническими и комбинированными установками. По данным этих установок возможно определение не только электропроводности разреза, но также параметра электрической анизотропии ( $\lambda$ ). Интерпретация всех данных ЗС и ВЭЗ выполняется на основе решения обратных задач для получения количественных оценок геоэлектрических параметров. По результатам интерпретации выполнен анализ временных вариаций электропроводности. Кроме того, впервые для этого региона рассмотрены временные изменения параметра электрической анизотропии. Причем параметр  $\lambda$  был получен по данным электроразведки как на постоянном, так и на переменном токе [Неведрова, Дашевский, 2010]. В настоящее время для Алтайского полигона экспериментально доказано, что оба параметра — удельное электрическое сопротивление и коэффициент анизотропии могут быть использованы при проведении электромагнитного мониторинга в сейсмоактивных районах для оценки воздействия геодинамических процессов на геологическую среду. Выявлены важные особенности глубинного и приповерхностного строения района исследования. Установлены закономерности процессов консолидации массива горных пород, подвергнутых сильному сейсмическому воздействию, а также основные факторы (геологические, сейсмологические, гидрогеологические), которые эти закономерности обуславливают.

**Геоэлектрическое строение и анализ результатов активного электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне.** Байкальский прогностический полигон создан в 1980-х годах усилиями специалистов трех организаций — геофизического объединения «Иркутскгеофизика» (г. Иркутск), Института геофизики СО РАН (г. Новосибирск) и Института высоких температур РАН (г. Москва). Исследовательская работа на полигоне с самого начала ориентирована на широкое применение электромагнитных методов с контролируемым источником.

Современный тектонический облик участка исследований сформирован в результате

многоэтапных тектонических процессов, происходивших в течение длительного геологического времени. Наиболее крупными геолого-тектоническими элементами участка являются Южно-Байкальская котловина оз. Байкал, заполненная водой, а также континентальные структуры, к которым относится Селенгинская депрессия и примыкающая к ней узкая прибрежная впадина от пос. Оймур до пос. Сухая, вытянутая вдоль побережья озера с юго-запада на северо-восток. Южно-Байкальская озерная котловина представляет собой грабен, в пределах которого мощность осадков достигает 6—7 км. Современная структура этой котловины создавалась в четвертичном периоде в два этапа за счет вертикальных опусканий блоков земной коры, инициированных общей обстановкой растяжения. Селенгинская депрессия является поперечной структурой относительно Южной котловины озера и непосредственно примыкает к ней [Саркисян, 1958; Сейсмогеология ..., 1981].

По сейсмологическим данным территория полигона относится к наиболее сейсмически активной центральной части Байкальской рифтовой зоны. Высокая сейсмичность объясняется современным развитием описанных выше крупных неотектонических структур [Сейсмогеология ..., 1981; Голенецкий и др., 1994]. Значительная часть землетрясений происходит в пределах акватории оз. Байкал. Селенгинская депрессия и прибрежная впадина относятся к наиболее сейсмоактивным, континентальным элементам рифтовой системы Прибайкалья и интересны тем, что есть возможность детально исследовать эпицентральные области крупных сейсмических событий, расположенных на суше. Меньшее количество сейсмических событий приходится на горное обрамление. Большинство землетрясений происходит в верхнем слое земной коры, мощность которого по последним сейсмологическим данным оценивается в 12—15 км. Глубже 35 км происходят только единичные события. В районе Среднего Байкала ежегодно фиксируется более 300 слабых и сильных землетрясений. На территории полигона располагается эпицентр катастрофического Цаганского землетрясения 1862 г., когда под воду по сбросам опустился изометричный тектонический блок площадью около 260 км<sup>2</sup> и образовался залив Провал. Процесс опускания блока продолжается до настоящего времени. Видимая часть сбросового рва вокруг залива имеет ширину около 4 м и протягивается от пос. Оймур до пос. Кудара.

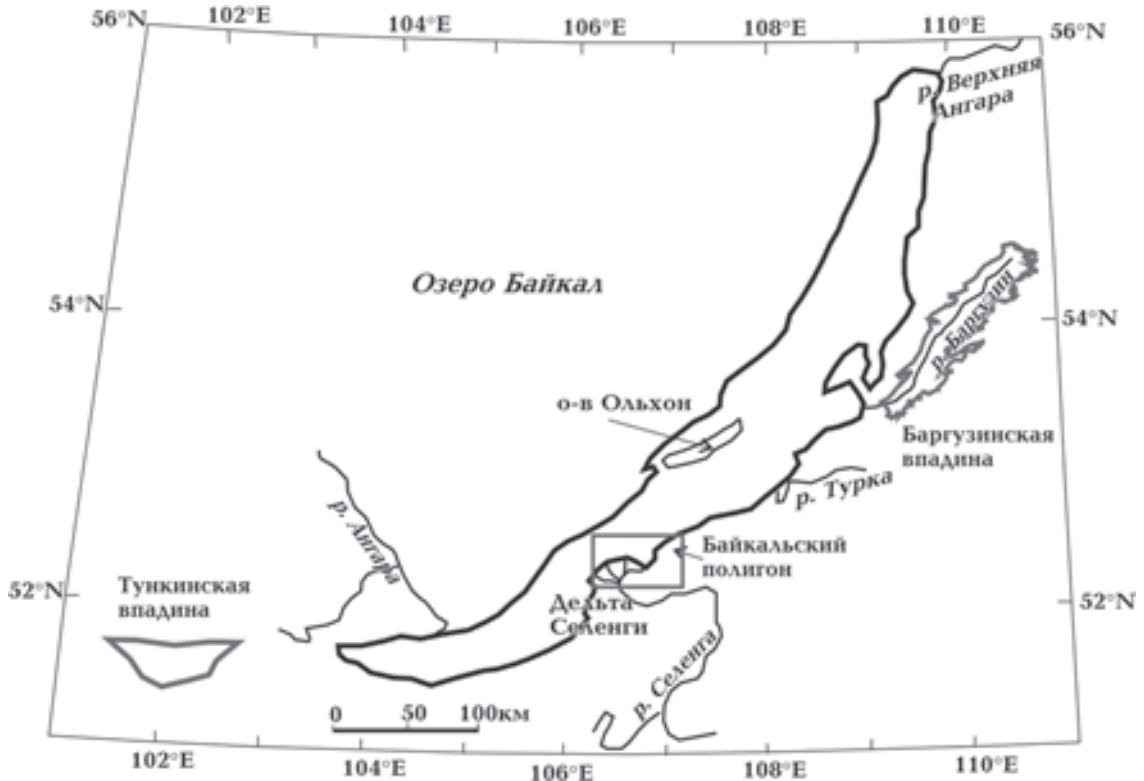


Рис. 1. Обзорная карта района исследования.

Регулярные наблюдения за электромагнитным полем с контролируемым источником (активный электромагнитный мониторинг) на Байкальском полигоне проводились в нескольких пунктах ежедневно несколькими методами на переменном и постоянном токе с помощью серийной электроразведочной аппаратуры. Обзорная карта района исследования с расположением прогностического полигона представлена на рис. 1.

Для организации измерений использованы две взаимно перпендикулярные генераторные линии АВ, имеющие длину 2 и 3 км. Обе линии размещены на сильно заболоченном участке в пойме р. Энхалук в 4-х км от берега озера.

В статье рассмотрены режимные измерения методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), которые осуществлялись с 1990 по 1996 г. Эти зондирования на постоянном токе были выполнены с использованием четырехэлектродной симметричной установки Шлюмберже с использованием 3-километровой генераторной линии. Они проводились ежедневно с некоторыми технологическими перерывами. Имеющаяся регистрирующая аппаратура обеспечивала погрешность измерений в пределах 2—3 %.

Одновременно с мониторингом на полигоне были развернуты электроразведочные работы, направленные на изучение геоэлектрического строения. Для этого были привлечены методы электромагнитных зондирований с контролируемым и естественным источниками: МТЗ, ВЭЗ, ЗС в нескольких модификациях, в том числе и с мощной энергетической установки «Полигон-1», позволившей повысить глубину исследований метода ЗС [Проявление ..., 1993]. Одним из результатов структурных работ стали геоэлектрические характеристики района исследований до глубины 10—20 км. По комплексу данных глубинных электромагнитных зондирований (МТЗ, ЗС с источником «Полигон-1») на глубине 10—12 км выделен проводящий коровый слой. Более подробные сведения о глубинном строении содержатся в работах [Манштейн и др., 1998; Морозова и др., 1999].

Для анализа результатов мониторинга методом ВЭЗ (режимный пункт ВЭЗ расположен в 4 км южнее пос. Энхалук, см рис. 2) требовались более детальные сведения о строении северо-восточного участка полигона. Поэтому значительная часть структурных измерений с активным источником выполнена в окрестно-

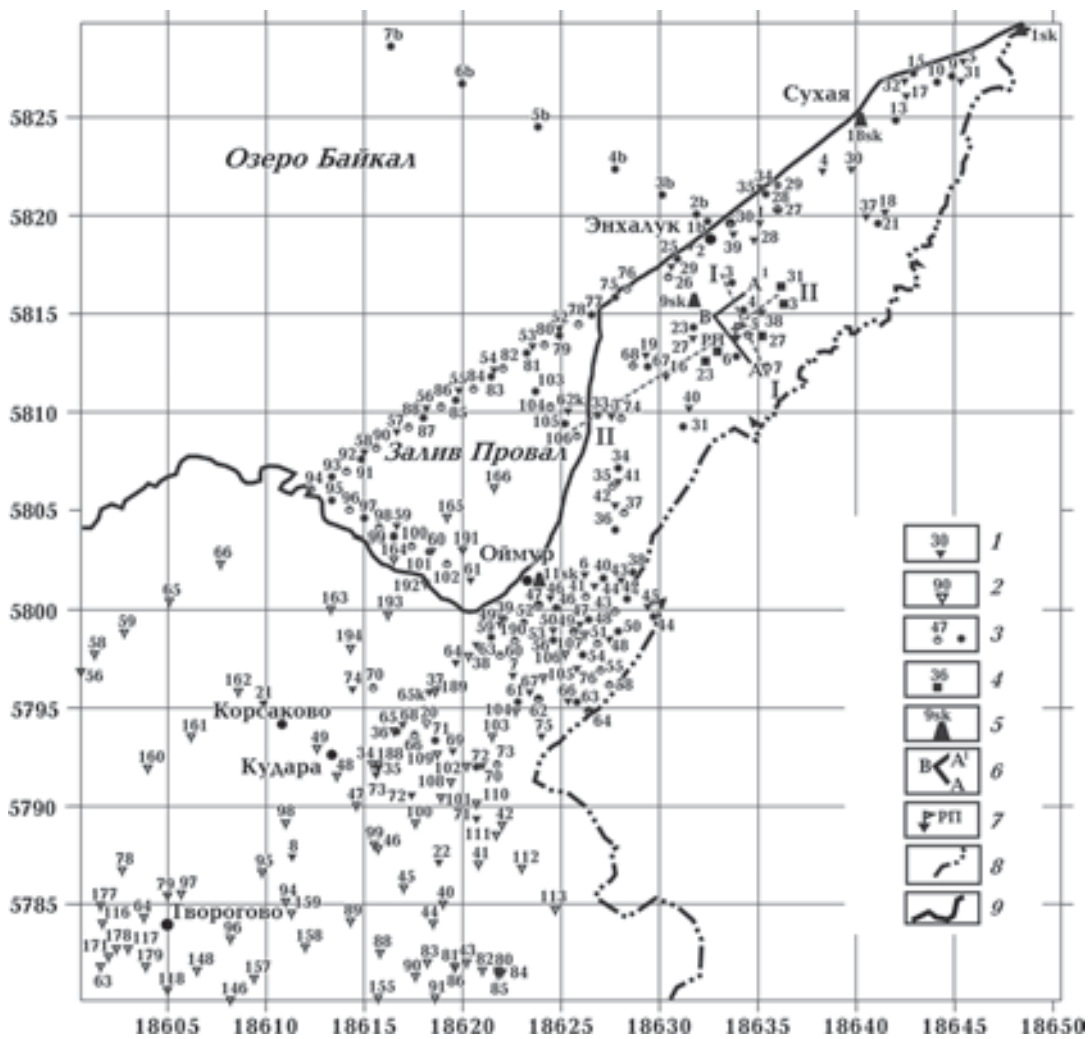


Рис. 2. Карта размещения пунктов режимных и структурных электромагнитных наблюдений комплексом методов на Байкальском прогностическом полигоне: 1 — пункты ВЭЗ, 2 — пункты глубинных ВЭЗ, 3 — пункты ЗСБ  $Q-Q$  и  $Q, q$ , 4 — пункты ЗС с источником «Полигон», 5 — скважины, 6 — питающие диполи (2–3 км), 7 — режимный пункт ВЭЗ, 8 — граница горного обрамления, 9 — береговая линия.

сти залива Провал и на его акватории по ледовым профилям, а также в прибрежной депрессии (пос. Оймур — пос. Сухая, пос. Заречье). Пункты структурных измерений размещены на участке неравномерно, что в основном связано с топографическими особенностями местности.

На рис. 2 показана схема размещения пунктов электромагнитных измерений за разные годы исследований, нанесены генераторные линии, имеющиеся скважины, а также отражены некоторые географические и морфологические данные, в частности, показана береговая линия, главные населенные пункты, граница горного обрамления.

В геологическом отношении северо-восточный участок представляет собой узкую впадину, вытянутую вдоль побережья озера и ограни-

ченную с юго-востока отрогами Приморского хребта. Со стороны оз. Байкал в прибрежной зоне наблюдается серия разломов. Очень плотная сеть наблюдений в южной береговой зоне залива Провал объясняется наличием на этом участке «старых» пунктов 1950-х годов и современных. На рис. 3 показана карта глубин до опорного электрического горизонта северо-восточного участка полигона. Глубины определены по результатам интерпретации данных всего комплекса электроразведочных работ (зондирования становлением поля в различных модификациях, ВЭЗ). Для привязки геоэлектрических структур нанесены пункты измерений и элементы топографии.

Карта глубин до опорного горизонта свидетельствует о блочном строении участка. В районе пункта мониторинга методом ВЭЗ на-

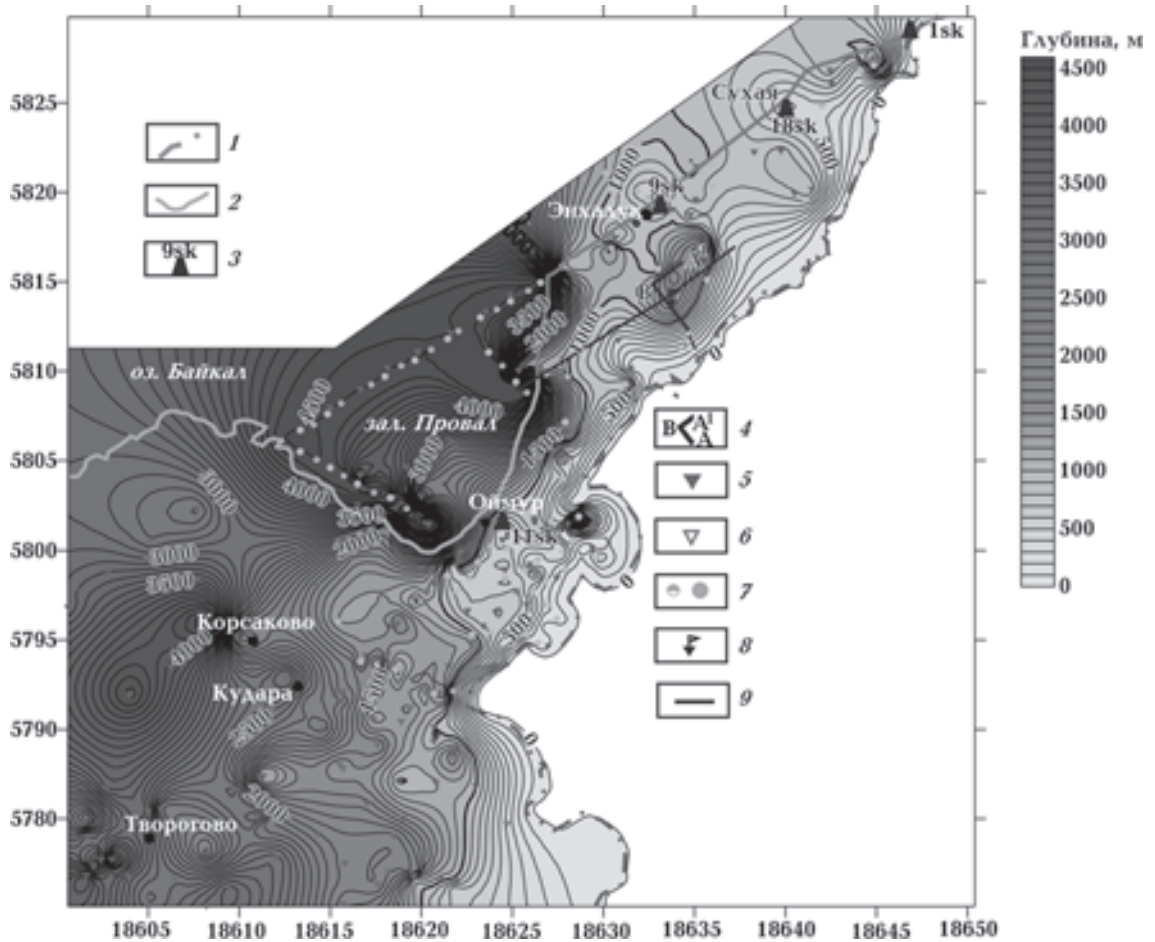


Рис. 3. Карта глубин до опорного электрического горизонта участка исследований на юго-восточном берегу оз. Байкал: 1 — граница горного обрамления, 2 — береговая линия, 3 — скважины, 4 — питающие диполи (2—3 км), 5 — пункты ВЭЗ, 6 — пункты глубинных ВЭЗ 1950-х годов, 7 — пункты ЗС  $Q-q$  и  $Q, q$ , 8 — пункт мониторинга ВЭЗ, 9 — линия профиля.

блюдается значительное увеличение мощности осадков. Следует также заметить, что осадочная толща с относительно низким сопротивлением и значительной мощностью порядка 800—1000 м простирается вплоть до береговой линии озера и разломных структур залива Провал. В заливе мощность осадков быстро возрастает, достигая 4500 м и более. Карта глубин до опорного геоэлектрического горизонта меняет представление о геологическом строении прибрежной северо-восточной депрессии. Все существующие немногочисленные скважины расположены в пределах приподнятых блоков, где мощность осадочного чехла не превышает 500—600 м. До проведения подробных электроразведочных работ считалось, что на этом участке рифтовой зоны не существует значительной мощности осадков. В качестве геологического обоснования результатов электроразведки была рассмотрена схема палеогеографии Прибайкалья в миоцене [Саркисян, 1958], ко-

торая свидетельствует о существовании в это геологическое время озерного водоема на юго-восточном побережье за дельтой р. Селенги в районе питающих диполей.

Рассмотрим также геоэлектрический разрез в районе режимного пункта ВЭЗ, отражающий особенности строения осадочного кайнозойского чехла и верхней части фундамента, важные для анализа мониторинговых данных. Линии разрезов показаны на рис. 2. Обратимся к геоэлектрическому разрезу по линии II—II, построенному по результатам интерпретации данных зондирований становлением поля и ВЭЗ, выполненному от акватории залива Провал и проходящему через участок с пунктом мониторинга ВЭЗ (рис. 4).

На этом разрезе показаны предполагаемые разрывные нарушения. Следует отметить, что разломы выделены в основном по резкому изменению мощности осадочной толщи в двух соседних пунктах. По рис. 3 и 4 можно су-

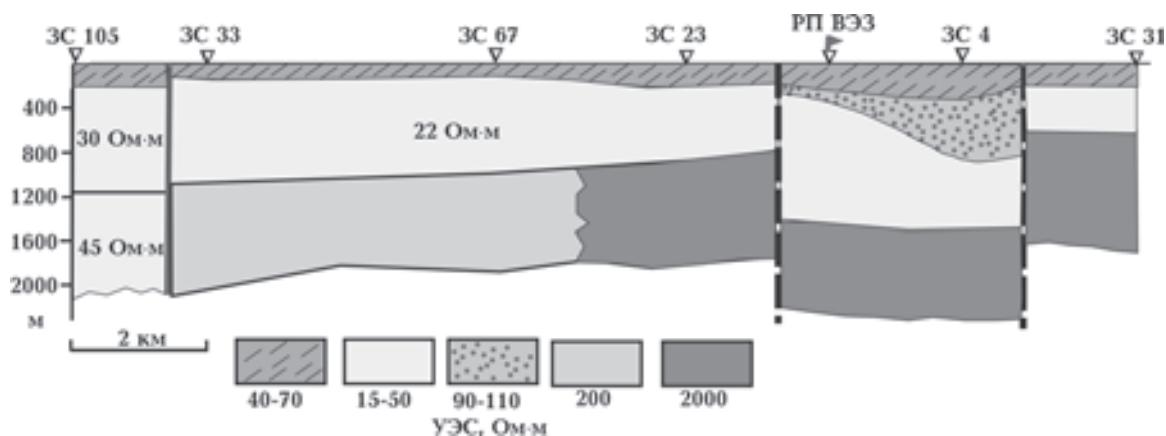


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю II—II на северо-восточном участке Байкальского полигона.

дить о геоэлектрическом строении на участке размещения пункта электрического мониторинга. Размеры погруженного блока, скорее всего ограниченного с нескольких сторон разломами, достаточно большие  $\sim 2,5 \times 3,5$  км. В геоэлектрическом разрезе осадочной толщи этого блока присутствуют несколько проводящих горизонтов, отличающихся по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). По согласованию с геологическими данными было выделено три осадочных горизонта.

На геоэлектрическом разрезе (см. рис. 4) хорошо просматривается система разноглубинных блоков. Начало профиля находится в заливе Провал, пункт ЗС 105 выполнен со льда озера. По результатам интерпретации данных этого пункта ЗС в заливе получено резкое нарастание мощности осадочной толщи, которая превышает 2 км. Залив ограничен известной разломной структурой. Затем на разрезе наблюдается протяженный блок (пункты ЗС 33—23) с мощностью осадков в среднем 800—900 м и относительно низкими значениями УЭС опорного горизонта (200 Ом·м). Такие значения УЭС, учитывая информацию по скважинам, характеризуют трещиноватые, обводненные породы фундамента. Далее по разрезу наблюдается грабен в районе пункта мониторинга ВЭЗ, расположенного в пределах тектонического блока с мощностью низкоомной осадочной толщи более 1200—1400 м. И наконец, по данным пункта ЗС 31, расположенного близко к восточного горному обрамлению, получена суммарная мощность осадков в 630 м, а высокоомный фундамент имеет УЭС, равное 2000 Ом·м. Именно особенности геоэлектрического строения этого участка позволят в даль-

нейшем объяснить выявленные закономерности вариаций электрических параметров.

Рассмотрим фрагмент обработки данных мониторинга ВЭЗ за временной интервал 1995—1996 гг. (рис. 5). При обработке режимных рядов обратная задача решается для каждого ежедневного измерения. В результате получаем геоэлектрические параметры разреза для всего временного интервала наблюдений. В качестве электрической характеристики рассматривается не удельное электрическое сопротивление. Модель среды одновременно характеризуется продольной проводимостью ( $S$ ) и поперечным сопротивлением ( $T$ ), вычисляемым для некоторого диапазона глубин по известным значениям проводимости. Известно, что интегральные параметры при решении обратной задачи определяются более устойчиво, по сравнению с электропроводностью. Затем проводится совместный анализ относительных вариаций истинных электрических параметров и сейсмического режима области. Этот подход впервые применен при обработке рядов мониторинга методом становления электромагнитного поля с мощным искусственным источником [Мандельбаум и др., 1996 б].

На рис. 5 приведены вариации  $\rho_k$  и интегральной проводимости  $ST$  на различных глубинах за 1994—1995 гг. Вариации соотношены с сейсмическими событиями,  $\Delta$  — расстояние от эпицентра сейсмического события до точки наблюдения. Землетрясения показаны стрелками в нижней части рис. 5. Величина стрелки зависит от класса землетрясения, приведена соответствующая масштабная линейка. Вариации  $\rho_k$  отражают сейсмические процессы, но в сравнении с параметром интегральной про-

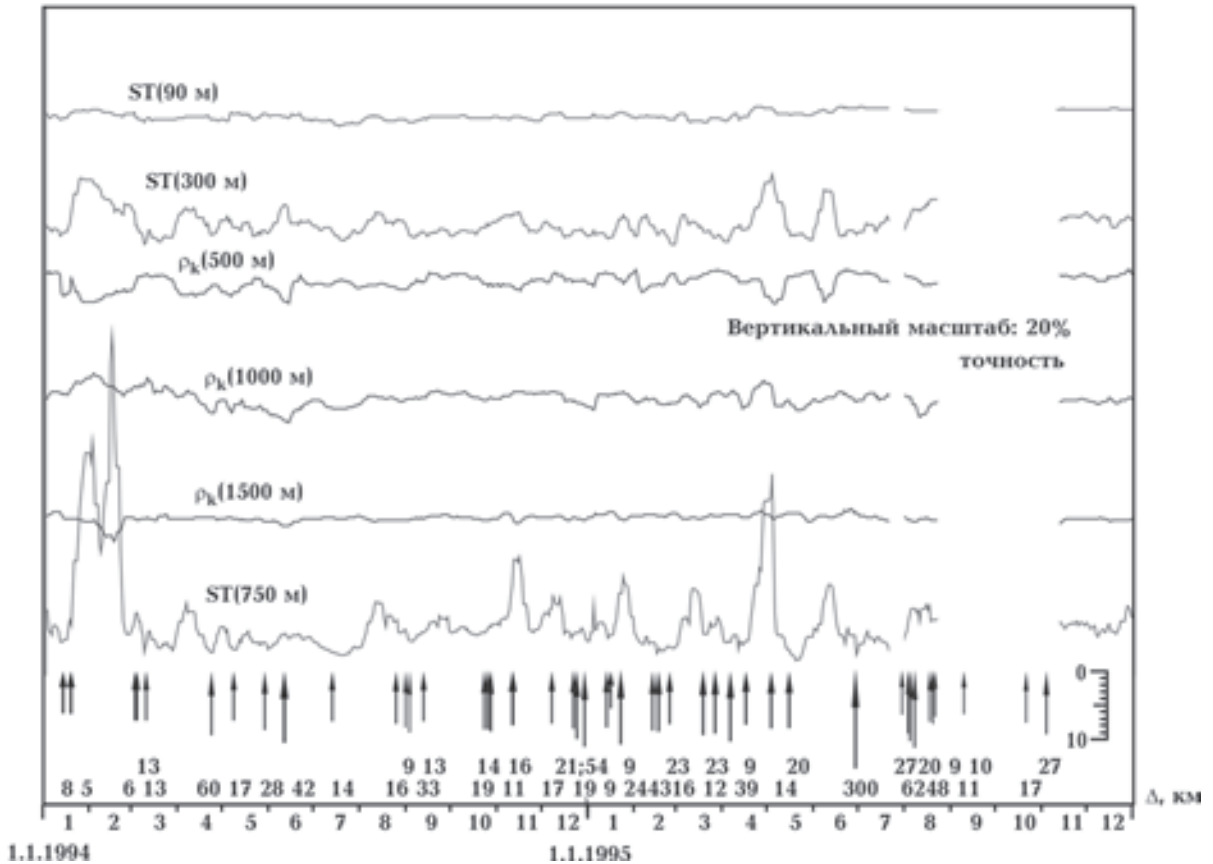


Рис. 5. Вариации интегральной продольной проводимости в сопоставлении с вариациями  $\rho_k$  и сейсмическими событиями в пункте мониторинга ВЭЗ за 1995—1996 гг. Байкальский полигон.

проводимости менее значимы. Рассмотрим наиболее выразительный временной ряд интегральной проводимости, рассчитанный для глубины 750 м. Здесь, как правило, сейсмическим событиям предшествует аномальный максимум проводимости, что соответствует понижению УЭС перед землетрясением [Дашевский и др., 2000].

Была отмечена определенная закономерность — во всем указанном временном диапазоне амплитуда локального максимума проводимости, предшествующего землетрясению, существенно меняется. Проведенный анализ вариаций интегральной продольной проводимости за весь период наблюдений (1990—1996) позволил установить различную чувствительность к сейсмическим событиям системы наблюдений за стационарным полем. Была выявлена зависимость величины вариаций интегральных параметров разреза от азимутального направления на эпицентр землетрясения, и в результате построена полярная диаграмма чувствительности (направленности) установки ВЭЗ для мониторинга. На диаграмме четко про-

слеживаются три области максимальной чувствительности установки по отношению к сейсмическим событиям. Далее было рассмотрено, какие уже известные геоэлектрические и тектонические особенности строения полигона можно обнаружить в выделенных на диаграмме направлениях. Одно из направлений повышенной чувствительности установки связано с эпицентрами, расположенными в системе известных разломов Черского. Второе, очень локальное, соответствует области пересечения двух прибрежных разломов, наблюдающихся в акватории озера на относительно небольших глубинах. В наиболее интересном направлении находятся хорошо изученные структурные элементы территории полигона — Селегинская депрессия и тектонический грабен залива Провал. Рассмотрение гидрогеологических данных показало, что район залива Провал и северо-восточная часть дельты принадлежат к участкам гидрогеодинамической активизации, связанной с сеймотектоническими процессами опускания дна залива Провал. В скважине,



пройденной в акватории залива, наблюдается наиболее высокая минерализация водоносного комплекса. Здесь же при сейсмических событиях происходит интенсивная разгрузка глубоко залегающих вод более древних отложений. В заливе Провал наблюдаются многочисленные термальные и грязевые источники, что обосновывает вывод об активном перемещении поровых и пластовых вод [Пиннекер и др., 1998]. Геоэлектрические характеристики разреза, представленного на рис. 4, также подтверждают этот вывод. Напомним, что профиль выполнен от пункта ЗС, расположенного в акватории залива, и далее пересекает участок режимных наблюдений ВЭЗ. Очевидно, что землетрясения, происходящие в разломных зонах залива Провал, активизируют перемещение поровых и пластовых вод во всех проводящих слоях побережья. При этом значительно изменяется флюидный режим, что приводит к существенному понижению УЭС осадочной толщи в пункте мониторинга ВЭЗ. Установлено также, что в районе этого пункта для фундамента получены высокие значения УЭС, и, следовательно, он представлен консолидированными породами, которые имеют обычно слабые фильтрационные свойства, что еще более способствует общему понижению УЭС вышележащих осадков при сейсмическом воздействии.

**Выводы.** 1. Установлена связь относительных вариаций электрических параметров разреза с происходящими сейсмическими событиями. Наблюдается следующая закономерность — сейсмическому событию предшествует локальный максимум электропроводности, который формируется в среднем за месяц до события или группы событий.

2. Амплитуды вариаций интегральной продольной проводимости зависят от нескольких причин. Они возрастают с ростом глубины (т. е. связаны с мощностью осадочной толщи) и зависят от азимутального направления на эпицентр сейсмического события.

3. Совместный анализ результатов мониторинга и особенностей геоэлектрического строения позволил установить, что вариации электропроводности, имеющие максимальные амплитуды по времени, связаны с сейсмическими событиями, происходящими в основных тектонических структурах полигона, таких как залив Провал, Селенгинская депрессия, прибрежные разломные зоны.

4. Можно сделать обоснованный вывод, что элементы современной тектонической структуры полигона образуют общую гидродина-

мическую систему. Пункт мониторинга, находящийся в пределах этой системы, имеет повышенную чувствительность к изменениям геодинамического режима.

**Электромагнитные исследования в районе Горного Алтая: геоэлектрические особенности строения и мониторинг.** В районе Горного Алтая в настоящее время выполнен значительный объем геолого-геофизических исследований. В 2004 г. были начаты полевые работы в эпицентральной зоне катастрофического Чуйского землетрясения [Рогожин и др., 2004] методами электрических и электромагнитных зондирований. Основная цель работ — определение и уточнение структурных особенностей территории, а также изучение временных вариаций геоэлектрических параметров, связанных с сейсмической активностью. Важной особенностью исследований является тот факт, что кроме УЭС рассматривается электрическая анизотропия верхних слоев земной коры и ее временные изменения. На основе анализа вариаций нескольких электромагнитных параметров исследуются процессы консолидации геологического массива горных пород, подвергнутого сильному сейсмическому воздействию.

Одним из последствий Чуйского землетрясения были выбросы и разливы разжиженных пород осадочного чехла в очень больших объемах в виде грифонов и грязевых вулканчиков, приуроченных в основном к низменным, заболоченным участкам. Горные породы этих участков, представленные водонасыщенными тонкодисперсными глинами, суглинками, песками, при сильных динамических воздействиях разжижались до текучего состояния и изливались на поверхность. При подготовке землетрясения и после него существенно изменились гидрогеологические условия Чуйского и Курайского артезианских бассейнов, а также гидрохимический состав подземных вод [Кац, Робертус, 2004; Кац, 2006]. Описанные явления свидетельствуют о масштабном перераспределении внутрислоевой и поровой влаги, что обычно приводит к значительным изменениям УЭС и служит обоснованием использования электромагнитных методов для задач мониторинга сейсмостектонических процессов в этом районе.

Так, в рамках одной статьи невозможно рассмотреть все аспекты геоэлектрических исследований в Горном Алтае, остановимся на результатах мониторинга методом ЗС с индуктивной установкой. Эти измерения выполнены в западной части Чуйской впадины.

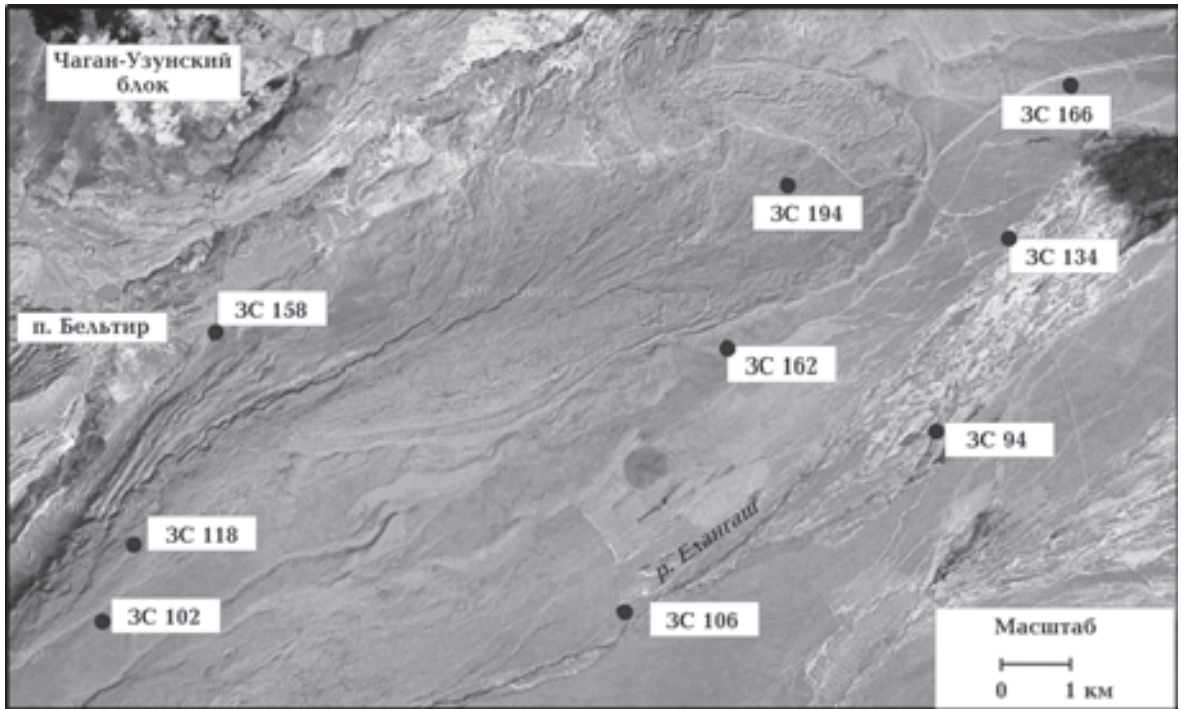


Рис. 6. Схема полевых режимных наблюдений методом ЗС с соосными петлями в западной части Чуйской впадины Горного Алтая.

Повторные ежегодные индукционные измерения ЗС с соосными установками начаты в 2004 г. после Чуйского сейсмического события. Современные пункты этих зондирований размещены на старых профилях 1980-х годов с сохранением размеров установок предшествующих работ [Лузгин, Русанов, 1992] (рис. 6).

Эпицентр Чуйского землетрясения расположен в 20 км на запад от пос. Бельтир. Тектонический разрыв события на земной поверхности прослеживается в виде прерывистой полосы трещин, оползней, смещений грунта. Общая протяженность сейсморазрыва достигает 70 км. Его проявления наблюдаются на склонах горных хребтов, ограничивающих Чуйскую впадину, и захватывают ее западную часть. Измерения ЗС повторяются в течение летних полевых сезонов 2004—2011 гг. Интерпретация всего объема полевых данных выполнена в компьютерных комплексах «Эра» и EMS на основе решения обратных задач, разработанных в ИНГГ СО РАН [Эпов, Ельцов, 1992; Хабинов и др., 2009]. В ходе интерпретации были привлечены априорные геологические и гидрогеологические данные, литолого-стратиграфические разрезы, тектонические схемы. Основные выводы сделаны на основании комплексного геолого-геофизического

анализа с учетом имеющихся сейсмологических данных. По данным ЗС 1980-х годов были оценены геоэлектрические параметры горных пород в период низкой сейсмической активности. Сравнение результатов количественной интерпретации современных (2004—2011) и архивных измерений позволяет проследить процесс восстановления массива горных пород после разрушительного сейсмического воздействия.

В ходе исследований получены количественные электромагнитные параметры осадочного заполнения и верхней части фундамента Чуйской депрессии. Построены геоэлектрические разрезы и карты изомощностей литологических комплексов для всей территории впадины. Эти данные позволяют судить о геологических особенностях впадины, которая, в общем, имеет разломно-блоковое строение и состоит из целого ряда прогибов и локальных поднятий [Неведрова и др., 2001]. Следует также отметить, что в настоящее время весь комплекс полевых данных геоэлектрики используется для построения неотектонической карты разломно-блокового строения депрессии. Данные современных электромагнитных измерений использованы для уточнения карты рельефа фундамента западного участка впадины (рис. 7).

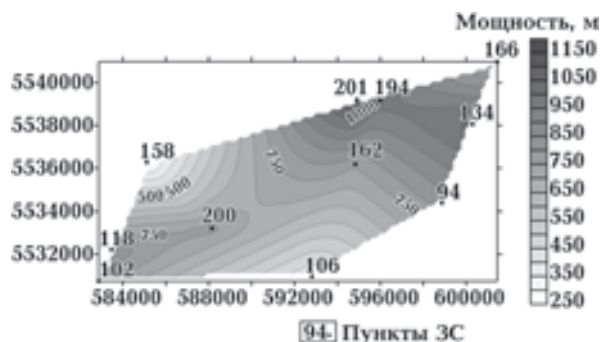


Рис. 7. Рельеф поверхности фундамента западного участка Чуйской впадины.

На рис. 7 самым темным цветом показаны места наибольшего погружения фундамента. Западная часть Чуйской впадины имеет в плане достаточно сложную конфигурацию, фактически здесь наблюдается чередование приподнятых и погруженных блоков с различной мощностью осадочного чехла. Например, режимные пункты ЗС 158 и 106 расположены в пределах приподнятых блоков недалеко от зоны основного разрыва Чуйского землетрясения. В области пунктов 194, 134 наблюдается погруженный блок фундамента, где мощность осадков достигает 1000 м. В районе пунктов ЗС 102, 118 глубина до опорного горизонта составляет 800 м.

Перейдем к анализу режимных наблюдений ЗС. Вначале рассмотрим полевые данные мониторинга, полученные в пункте ЗС 106, за весь интервал измерений (рис. 8). Так как пункт находится в приподнятом блоке, глубина до фундамента здесь составляет 400 м, а четырехслойный разрез представлен чередованием проводящих осадков. Кривые  $\rho_k$  отражают закономерные изменения геоэлектрического состояния среды с течением времени. Максимальные изменения  $\rho_k$  относительно значений до события наблюдались в 2004 г. Затем в течение 2005 и 2006 г. амплитуда вариаций последовательно и значительно уменьшалась. Начиная с 2007 г., различия между кривыми  $\rho_k$  за каждый следующий год небольшие. Можно сделать вывод, что геологический массив на этом участке в 2007—2011 гг. находится в новом относительно стабильном состоянии, а наблюдаемые вариации в интервале 10—15 % за этот временной интервал отражают происходящий афтершоковый процесс [Еманов и др., 2011].

В результате интерпретации электромагнитных данных на основе решения обратной задачи получены истинные геоэлектрические параметры разреза за все годы измерений. Да-

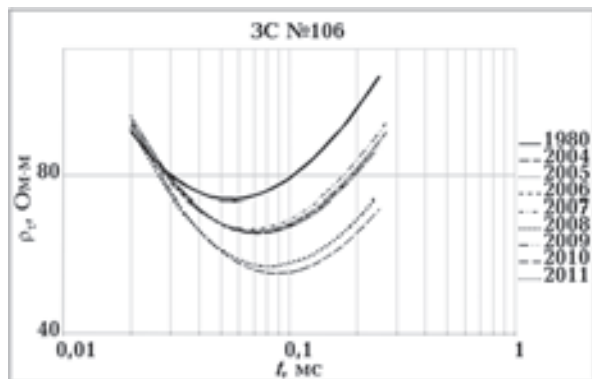


Рис. 8. Изменения кривых  $\rho_k$  пунктов ЗС 106 с 2004 по 2011 г. Чуйская впадина.

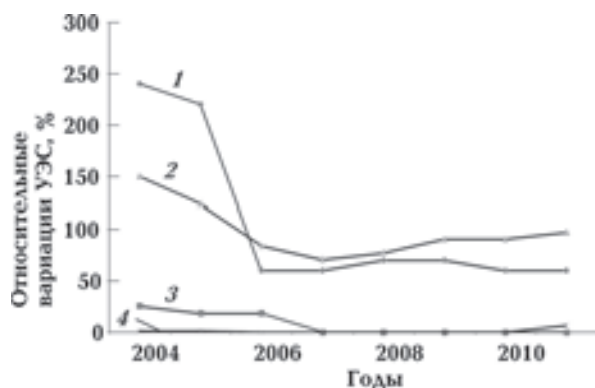


Рис. 9. Относительные вариации УЭС второго горизонта разреза за 2004—2011 гг. для пунктов ЗС 106, 102, 158, 134. Чуйская впадина.

лее анализируются вариации физической характеристики разреза — УЭС. Для того чтобы показать количественные изменения УЭС для других пунктов измерений, приведем относительные вариации УЭС в процентах по данным пунктов ЗС 106, 102, 158, 134 (рис. 9).

Перечисленные пункты расположены на разных расстояниях от зоны основного разрыва и в различных тектонических блоках. В результате инверсии полевых данных для каждого зондирования была получена четырехслойная геоэлектрическая модель, которая содержит три осадочных слоя и высокоомный опорный горизонт, отнесенный по геологической информации к породам палеозойского фундамента [Неведрова и др., 2001]. Вариации УЭС рассчитаны для наиболее проводящих слоев модели за весь временной интервал измерений относительно значений 1980 г. На рис. 9 показаны вариации УЭС второго слоя разреза. Представлены две группы графиков, значительно различающихся по уровню вариаций УЭС. В 2004 г. после Чуйского землетрясения по данным пунктов ЗС 106 и 102 получены

максимальные вариации, превышающие 200 %. По данным пункта ЗС 158 отмечаются сравнительно небольшие вариации в пределах 30 %, а для пункта ЗС 134 — менее 10 %. Причин такого различия, по крайней мере, несколько. Это геологические и тектонические особенности исследуемого участка. Пункты измерений ЗС 106 и 102, для которых выявлена максимальная реакция на сейсмическое воздействие, расположены наиболее близко к зоне основного разрыва, на расстоянии 1,5—2 км. Мощность низкоомных осадков здесь значительна, достигает 400 м и более.

Далее обратимся к характеристикам пунктов ЗС 158 и 134 с существенно меньшими изменениями значений УЭС. Пункт 158 расположен в 2-х км от зоны основного разрыва, но если рассмотреть геоэлектрическую модель для этого ЗС, то мощность проводящего горизонта составляет всего 40 м, причем этот горизонт перекрыт высокоомными отложениями мощностью 230 м. Пункт 134 расположен достаточно далеко от сейсморазрыва, на расстоянии примерно в 10 км. Этот пункт находится в пределах крупного тектонического блока, мало затронутого сейсмическим воздействием, за весь временной интервал наблюдений вариации электрических параметров на этом участке небольшие (10—15 %).

Несмотря на явные различия в реакции ЗС на сейсмические события, имеется общая закономерность. Для всех рассмотренных пунктов начиная с 2007 г. значения геоэлектрических параметров стабилизируются, даже для пунктов с максимальной чувствительностью уровень вариаций не превышает в среднем 15 %, причем некоторое увеличение амплитуд вариаций в 2008—2009 гг. связано с повышением сейсмической активности в районе Горного Алтая.

Так как удалось расположить пункты измерений по площади участка, в результате обработки и интерпретации всего объема полевых данных мониторинга ЗС получено площадное распределение временных изменений электропроводности (рис. 10). Пунктиром отмечена примерная линия выхода на земную поверхность тектонического разрыва Чуйского землетрясения, механизм которого определен как правосторонний сдвиг. Следует отметить, что все имеющиеся режимные пункты ЗС разделены основным разрывом, часть из них размещена в пределах глобального юго-восточного блока, а часть находится в блоке, который двигался во время события в северо-западном направлении. Аномалии удельного сопротивления ( $\Delta\rho$ ) рассчитаны для двух осадочных горизонтов разреза относительно значений сопро-

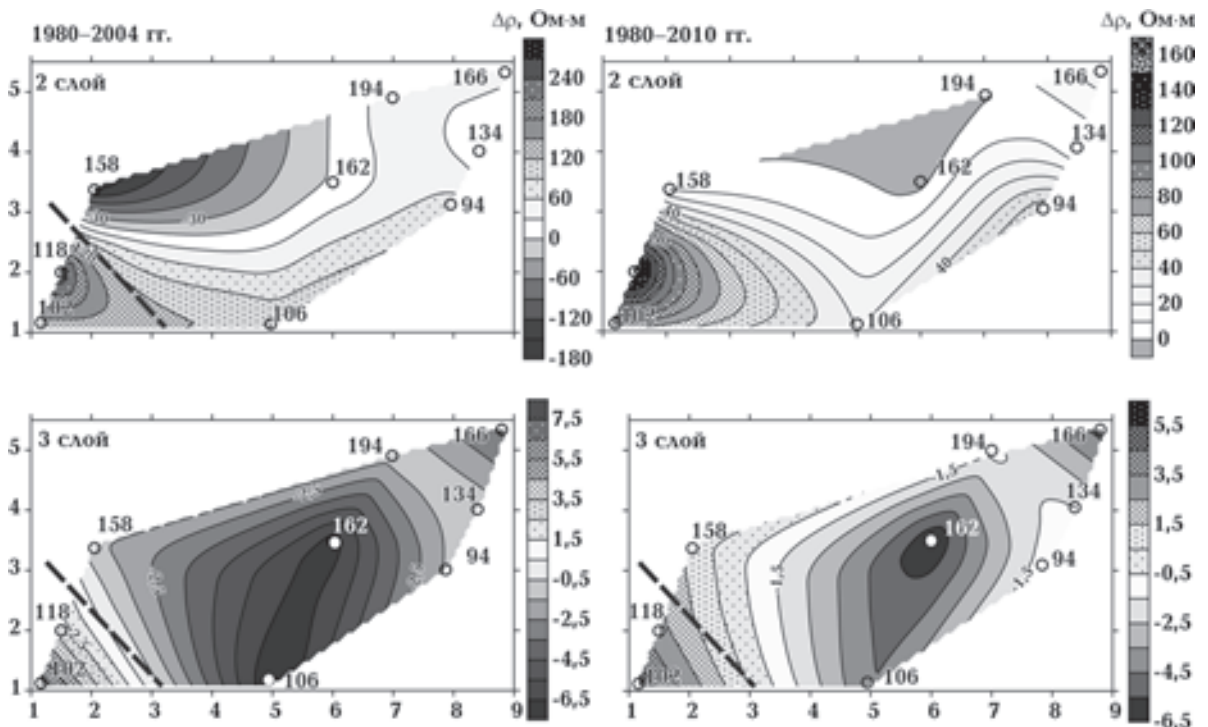


Рис. 10. Площадные изменения ( $\Delta\rho$ ) осадочных слоев разреза после Чуйского землетрясения.

тивления, полученных в 1980-х годах, учитывая знак отклонений.

Отметим, что значения УЭС второго слоя геоэлектрической модели варьируют по площади в интервале от 50 до 200 Ом·м. Для третьего более проводящего горизонта значения УЭС изменяются меньше — от 10 до 30 Ом·м, по геологическим данным отложения здесь представлены однородными тонкослоистыми породами. Различным крапом отмечены области, где сопротивление слоев после события увеличилось, на участках без крапа значения УЭС уменьшались. Для сравнения на рис. 10 показано площадное распределение относительных аномалий сопротивления в 2004 и 2010 гг. Можно отметить, что с течением времени контрастность между положительными и отрицательными аномалиями уменьшается.

Анализ данных, представленных на рис. 10, позволяет сделать вывод, что область смены знака аномалий УЭС для третьего горизонта сразу после события фактически соответствует положению тектонического разрыва разрушительного землетрясения. Рис. 10 отражает также количественные временные изменения УЭС. По приведенной шкале значений  $\Delta R$  можно оценить максимальную разницу между положительными и отрицательными значениями сопротивлений. Эта разница в 2011 г. стала существенно меньше, чем в 2004 г., для обоих горизонтов разреза.

**Выводы.** 1. По результатам интерпретации данных режимных электромагнитных зондирований становлением поля в западной части Чуйской впадины выявлены особенности релаксации геологического массива, нарушенного катастрофическим землетрясением. Показано, что по этим 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. В течение 2007—2011 гг. вариации УЭС отражают текущую сейсмичность — продолжающийся афтершоковый процесс Чуйского землетрясения.

3. Совместный анализ данных режимных наблюдений и сейсмичности подтверждает высокую чувствительность электромагнитных методов к изменению напряженного состояния геологического массива.

4. Степень влияния современных геодинамических процессов на измеренные электромагнитные поля определена на основе количественных оценок вариаций УЭС.

5. Одним из важных результатов исследования является обнаружение участков геологической среды, обладающих повышенной чувствительностью к сейсмическому воздействию на относительно небольших глубинах (300—1000 м). Это свидетельствует, что при использовании электромагнитных методов с контролируемым источником для наблюдений в сейсмоактивных районах можно следить за развитием геодинамических процессов не на глубинах гипоцентров, а значительно выше, выявив чувствительные зоны геологического массива в самой верхней части земной коры.

**Заключение.** В статье приведено обобщение результатов по Байкальскому полигону. Для него продемонстрированы возможности геоэлектрики на постоянном токе для задач мониторинга сеймотектонических процессов, показано формирование аномальных вариаций электрических параметров разреза в зависимости от геологических особенностей строения полигона, гидрогеологического и сейсмического режима.

Для Алтайского геодинамического полигона представлены новые данные геоэлектрических исследований. Проанализированы результаты индуктивных методов геоэлектрики для режимных наблюдений за процессом консолидации геологического массива горных пород после сильного разрушительного землетрясения. Выявлены основные закономерности этого процесса, отражающиеся в электромагнитных полях. Следует отметить, что исследования в районе Горного Алтая продолжаются. По электроразведочным и геологическим данным будет построена неотектоническая схема Чуйской впадины, которая позволит более детально обосновать полученные результаты электромагнитного мониторинга методом ЗС с точки зрения разломной тектоники.

Таким образом, рассмотрены два сейсмоактивных региона России, в каждом из которых напряженное состояние земной коры вызвано разными причинами. В Байкальской рифтовой системе, в общем, преобладает поперечное растяжение в верхней части литосферы, формирующее глубокий грабен оз. Байкал, ограниченный сбросами глубокого заложения [Милановский, 1976]. Здесь наблюдаются землетрясения с различными типами смещений (в Центральном Байкале преобладает сбросовый тип). В

Алтае-Саянской горной области преобладают очаги сдвигового типа [Парфеевец, Саньков, 2006] и имеются совсем иные гидрогеологические условия. Это следует учитывать при анализе данных электромагнитного мониторинга.

На территории побережья оз. Байкал при небольших тектонических подвижках начинают перемещаться значительные объемы водных растворов. При этом на временных рядах мониторинга наблюдаются аномальные амплитуды вариаций, предвещающие землетрясения даже небольшого энергетического класса, особенно, если эти события происходят друг за другом с небольшим интервалом или

происходят в ближайших к пункту измерения тектонических структурах. Хотя, безусловно, наблюдается зависимость между вариациями и магнитудой землетрясения.

Для Горного Алтая у нас пока недостаточно статистики, тем не менее по имеющимся данным здесь наблюдается прямо пропорциональная зависимость величины вариаций УЭС и энергетического класса события.

Представленные в статье результаты позволяют сделать общий вывод об эффективности использования электромагнитных методов с контролируемым источником для изучения напряженного состояния земных недр.

### Список литературы

- Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Файнберг Э. Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. — 2005. — № 6. — С. 55—65.
- Барсуков О. М., Сорокин О. Н. Изменения кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1973. — № 10. — С. 100—102.
- Голенецкий С. И., Ружич В. В., Дреннова Г. Ф., Емельянова И. А. Ощутимые и сильные землетрясения района дельты реки Селенги и толчок 13 июля 1993 г. // Вулканология и сейсмология. — 1994. — № 4—5. — С. 215—223.
- 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 // Докл. АН. — 2000. — 370, № 6. — С. 807—809.
- Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения. — Москва, 1991. — 219 с.
- Еманов А. Ф., Лескова Е. В., Подкорытова В. Г., Фатеев А. В. Алтай и Саяны // Землетрясения России в 2009 году. — Обнинск: ГС РАН, 2011. — С. 27—30.
- Журавлев В. И., Коновалов Ю. Ф., Лукк А. А., Сигорин А. Я. Модель геоэлектрического разреза земной коры Гармского района в сопоставлении с геологическими и сейсмологическими данными // Физика Земли. — 1998. — № 8. — С. 38—48.
- Кац В. Е. Состояние подземных вод в Республике Алтай в период сейсмической активизации в Алтае-Саянском регионе // Основные проблемы охраны окружающей среды и благополучия человека в Сибирском федеральном округе, перспективы их решения. — Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2006. — С. 55—59.
- Кац В. Е., Робертус Ю. В. Гидрогеологические особенности в эпицентральной части Чуйского землетрясения // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. — Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алтайского гос. ун-та, 2004. — С. 99—102.
- Лузгин Б. Н., Русанов Г. Г. Особенности формирования неогеновых отложений юго-востока Горного Алтая // Геология и геофизика. — 1992. — № 4. — С. 23—29.
- Мандельбаум М. М., Дашевский Ю. А., Морозова Г. М., Неведрова Н. Н., Грехов И. О., Мартынов А. Н. Применение технологии геоинформационных систем для решения обратной задачи глобальных электрических зондирований в дельте р. Селенги // Геофизика. — 1996а. — № 1. — С. 61—68.
- Мандельбаум М. М., Эпов М. И., Морозова Г. М., Неведрова Н. Н., Ельцов И. Н. Сейсмическая активность и динамика электропроводности земной коры на Байкальском прогностическом полигоне // Геология и геофизика. — 1996б. — 37, № 6. — С. 88—94.
- Манштейн А. К., Морозова Г. М., Ельцов И. Н., Неведрова Н. Н. Глубинные электромагнитные зондирования с контролируемым источником в Байкальской рифтовой зоне // Геофизические методы изучения земной коры: Сб. науч. докл. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — С. 57—63.
- Милановский Е. Е. Рифтовые зоны континентов. — Москва: Недра, 1976. — С. 122—140.
- Морозова Г. М., Дашевский Ю. А., Неведрова Н. Н., Грехов И. О. Глубинное распределение электро-

- проводности и поля напряжений Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. — 1999. — **40**, № 3. — С. 322—346.
- Неведрова Н. Н., Дашевский Ю. А. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 309 с.
- Неведрова Н. Н., Эпов М. И., Антонов Е. Ю., Дашевский Ю. А., Дучков А. Д. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. — 2001. — **42**, № 9. — С. 1399—1416.
- Неведрова Н. Н., Эпов М. И., Дашевский Ю. А. Определение структуры массива горных пород и анализ результатов электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2004. — № 3. — С. 29—45.
- Парфеевец А. В., Саньков В. А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. — Новосибирск: ГЕО, 2006. — 149 с.
- Пиннекер Е. В., Попов А. М., Шпынев Е. Б. О глубине проникновения приповерхностных вод в земную кору (на примере Прибайкалья) // Докл. АН. — 1998. — **359**, № 1. — С. 345—348.
- Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / Под ред. Е. П. Велихова, В. П. Зейгарника. — Москва: Наука, 1993. — 158 с.
- Рыбин А. К. Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических зондирований. — Москва: Научный мир, 2011. — 272 с.
- Рогожин Е. А., Овсяченко А. Н., Мараханов А. В., Ушанова Е. А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. — Москва: ИФЗ РАН, 2004. — С. 25—37.
- Саркисян С. Г. Мезозойские и третичные отложения Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока. — Москва: Изд-во АН СССР, 1958. — 336 с.
- Светов Б. С. Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1992. — № 2. — С. 9—115.
- Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Отв. ред. В. П. Солоненко. — Новосибирск: Изд-во «Наука» СО РАН, 1981. — 167 с.
- Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. — Москва: Наука, 1993. — 313 с.
- Хабинов О. Г., Чалов И. А., Власов А. А., Антонов Е. Ю. Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS: Сб. науч. ст. — Новосибирск: ГЕО, 2009. — С. 108—113.
- Эпов М. И., Ельцов И. Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, — 1992. — 30 с.
- Bragin V. D., Volykhin A. D., Trapeznikov Yu. A. Electrical resistivity variations and moderate earthquakes // Tectonophysics. — 1992. — **202**, № 2—4. — P. 233—238.